

Вестник Донского государственного технического университета

Теоретический и научно-практический журнал

Vestnik of Don State Technical University

Том 17 | Vol. 17
№ 2 | no. 2
2017 | 2017

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006

1. Механика
   Mechanics
2. Машиностроение и машиноведение
   Machine Building and Machine Science
3. Информатика, вычислительная техника и управление
   Information Technology, Computer Science, and Management
4. Процессы и машины агроинженерных систем
   Processes and Machines of Agro-Engineering Systems
5. Безопасность деятельности человека
   Safety of Human Activity

DOI 10.23947/1992-5980

vestnik.donstu.ru

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2017
Т. 17, № 2 (89)

Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
апрель-июнь 2017 г.

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25.07.2014 г. №793 с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03.06.2015 г. №560 **(Перечень ВАК)**

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования **(РИНЦ)**, а также в международной базе **EBSCO**

Является членом **Cross Ref**

Над номером работали: И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 28.06.2017., дата выхода в свет 30.06.2017.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 30/06 Цена свободная.

Адрес редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес издателя:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес полиграфического предприятия:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.
http://science.donstu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Theoretical and Scientific-Practical Journal

4 issues a year
April-June 2017

VESTNIK of DON STATE TECHNICAL UNIVERSITY 2017

Vol. 17, № 2 (89)

Included in the list of peer-reviewed scientific editions where the basic research results of doctoral, candidate's theses should be published in accordance with order of Ministry of Education and Science of RF no. 793, July 25, 2014, as amended by order of the Ministry of Education and Science of RF no.560, June 3, 2015.

The journal is indexed and archived in the Russian Science Citation Index (RSCI), and in EBSCO International Database.

The journal is a member of Cross Ref

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 28.06.2017, imprint date 30.06.2017.
Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order 30/06 Free price.
Editorial Board's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Publisher's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.
http://science.donstu.ru

Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-66004 of 06.06.2016. issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST

MECHANICS

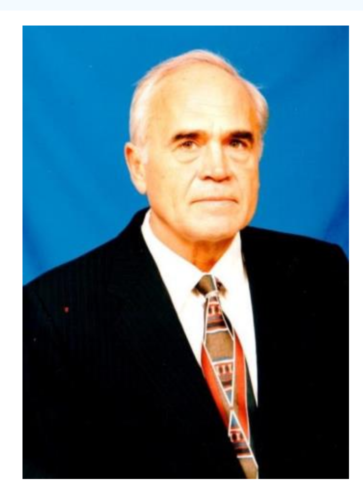
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

PROCESSES AND MACHINES OF AGRO-ENGINEERING SYSTEMS

SAFETY OF HUMAN ACTIVITY

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST





80 ЛЕТ ЧЕРНЫШЕВУ Ю. О. — ЗАСЛУЖЕННОМУ ДЕЯТЕЛЮ НАУКИ РФ

TO THE 80TH ANNIVERSARY OF YURY O. CHERNYSHEV

11 июля 2017 года профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ **Юрий Олегович Чернышев** отмечает свой 80-летний юбилей и 58-ю годовщину научной, педагогической и научно-организационной деятельности.

Ю. О. Чернышев родился 11 июля 1937 года в городе Сочи, СССР.

В 1959 году окончил Таганрогский радиотехнический институт. В 1967 году защитил кандидатскую, а в 1984 году — докторскую диссертации. В 1985 году получил звание профессора.

С 1959 по 1980 годы, работая в Ростове-на-Дону, занимал должности:

— старшего инженера;

— начальника группы Ростовского высшего военного командно-инженерного училища ракетных войск (РВВКИУ РВ) имени Главного маршала артиллерии М. И. Неделина;

— старшего инженера, и. о. начальника лаборатории, старшего научного сотрудника предприятия п/я 20;

— аспиранта Института кибернетики АН УССР (г. Киев);

— старшего преподавателя, доцента Ростовского института сельскохозяйственного машиностроения.

С 1980 по 1983 годы — директор Северо-Кавказского филиала Российского отделения Всесоюзного государственного проектно-технологического института по механизации учета и вычислительных работ Центрального статистического управления (ЦСУ) СССР.

С 1983 года — заведующий кафедрой «Электротехника и автоматизация производственных процессов» Ростовской государственной академии сельскохозяйственного машиностроения (РГАСХМ).

В 1988 году основал в РГАСХМ кафедру «Прикладная математика и вычислительная техника», которой заведовал до 2010 года.

С 1991 по 1995 годы — директор (совместитель) хозрасчетного отделения Международного агентства авиакосмических систем в рамках неправительственной международной организации «Форум ученых и специалистов за советско-американский диалог».

С 1995 по 2000 годы — ректор (совместитель) негосударственных институтов «Новые технологии, управление и международное сотрудничество» и «Предпринимательство и международные связи».

С 2011 года по настоящее время — профессор (совместитель) кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета, профессор Краснодарского высшего военного училища (КВВУ) имени генерала армии С. М. Штеменко.

Ю. О. Чернышев является ведущим ученым в области оптимального проектирования производственных процессов и вычислительных структур, практического создания систем автоматизированного проектирования, автоматизированных систем технологических процессов и контроля.

Ю. О. Чернышев внес большой вклад в подготовку научных и педагогических кадров высшей квалификации. Он обогатил науку крупными научными трудами и разработками в области вычислительной техники, теоретической и технической кибернетики в народном хозяйстве и оборонной промышленности, работая по совместительству в НИИ Специальных информационно-измерительных систем и ВНИИ «Градиент» (г. Ростов-на-Дону). Под его руководством и при непосредственном участии выполнено порядка 75 фундаментальных госбюджетных и хозрасчетных НИОКР

государственного уровня, значительный экономический эффект которых подтвержден соответствующими актами о внедрении.

С 2010 по 2017 годы под его руководством выполнен ряд фундаментальных НИР по грантам РФФИ.

Под руководством Ю. О. Чернышева сформировалась и успешно функционирует научная школа, исследующая нетрадиционные модели и методы решения оптимизационных задач проектирования. В рамках данной школы Ю. О. Чернышевым подготовлены 7 докторов и 34 кандидата наук.

Среди результатов плодотворной научной деятельности Ю. О. Чернышева — 450 научных работ, в том числе:
— 16 монографий,
— 22 изобретения (патенты),
— 12 программ в фондах алгоритмов и программ.

Ю. О. Чернышев получил признание отечественной и зарубежной научной общественности. С 1976 по 2016 годы он являлся членом диссертационных советов по защите докторских диссертаций при Технологическом институте Южного федерального университета (г. Таганрог); с 1990 по 2000 годы — при РВВКУ; с 1995 — при РГАСХМ; с 2012 года по настоящее время — при КВВУ.

С 1995 по 2000 годы Ю. О. Чернышев — рецензент международного журнала «Математическое обозрение» (США, Мичиганский университет), член Американского математического общества.

В 1995 году Ю. О. Чернышев избран академиком Нью-Йоркской академии наук. В различные годы Ю. О. Чернышев избирался академиком следующих организаций:
— Академия проблем качества (1995);
— Академия национальной безопасности (1997);
— Международная академия информатизации (1998);
— Российская академия естествознания (2007).

С 1997 по 1999 годы работал экспертом экспертно-консультативного Совета по проблемам национальной безопасности Государственной Думы Российской Федерации.

В 1999 году Ю. О. Чернышеву присвоено почетное звание «Соросовский профессор» по математике. В 2000 году большой вклад Юрия Олеговича в развитие системы естественнонаучного образования Ростовской области подтвержден Сертификатом лауреата гранта Губернатора Ростовской области и Джорджа Сороса, а в 2001 году — благодарностью Главы администрации (Губернатора) Ростовской области «За большой личный вклад в развитие донской науки и профессионального образования».

С 2004 по 2016 годы Ю. О. Чернышев являлся председателем Государственной аттестационной комиссии Технологического института Южного Федерального университета (г. Таганрог) по выпуску специалистов кафедры «Системы автоматизированного проектирования», специальность 230104.

В 1996 году указом Президента РФ Ю. О. Чернышеву присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РФ», в 2003 году он награжден орденом Дружбы, в 2007 году — орденом «Рыцарь прогресса», в 2008 году — золотой медалью им. В. И. Вернадского.

За успехи в деле развития науки имя Ю. О. Чернышева включено в международные справочники выдающихся лидеров Американского и Британского библиографических институтов, в энциклопедии Таганрогского радиотехнического университета и «Знаменитые люди Дона» 2004 г., а в 2009 году — в энциклопедию «Who is Who в России» международного швейцарского издательства «Who is Who».

Решением ученого совета ДГТУ от 26 июня 2011 года Ю. О. Чернышеву присвоено почетное звание «Почетный профессор ДГТУ».

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.3 10.23947/1992-5980-2017-17-2-7-11

К одной задаче Белоконя А. В.*

Д. А. Пожарский[1], Н. Б. Золотов[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

To one Belokon's problem ***

D. A. Pozharskii[1], N. B. Zolotov[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Кандидатская диссертация проф. А.В. Белоконя (1941-2013), который на протяжении многих лет был ректором Ростовского государственного университета, а затем Президентом Южного федерального университета, была посвящена асимптотическим методам решения контактных задач теории упругости для тел цилиндрической формы (1969 год). В настоящей работе исследуется контактная задача теории упругости о кручении жестким вкладышем бесконечного полого цилиндра, внешняя поверхность которого жестко закреплена. Вкладыш находится внутри цилиндра и имеет конечную длину. Эта задача была в 1971 году поставлена и изучена А.В. Белоконем, который при помощи интегрального преобразования Фурье свел ее к интегральному уравнению относительно неизвестного контактного напряжения. А. В. Белоконь получил полное решение данной задачи для случая толстостенных цилиндров, когда символ ядра интегрального уравнения может быть аппроксимирован функцией, соответствующей кручению пространства с цилиндрической шахтой. В настоящей работе рассматривается преимущественно случай тонкостенных цилиндров, дополняющий решение А. В. Белоконя. *Материалы и методы*. Материал цилиндра считается линейно-упругим. При решении задачи используется метод интегральных преобразований. Для решения интегрального уравнения применяется сингулярный асимптотический метод.

Результаты исследования. На основе исследования свойств функции-символа ядра интегрального уравнения предложена новая специальная легко факторизуемая аппроксимация этого символа, пригодная для цилиндра любой толщины. Для нахождения оптимальных параметров этой аппроксимации используется метод Монте-Карло. Расчеты сделаны в основном для тонкостенных цилиндров. В результате в аналитическом виде получено асимптотическое решение интегрального уравнения.

Обсуждение и заключение. Найденное новое решение эффективно для относительно длинных жестких вкладышей, длина которых превышает внутренний диаметр цилиндра. Метод, основанный на новой аппроксимации, остается применимым и для случаев, когда цилиндр можно рассматривать как цилиндрическую оболочку. Асимптотическое решение можно

Introduction. Prof A.V. Belokon's (1941-2013; former Rector of Rostov State University and President of Southern Federal University) PhD thesis was devoted to asymptotical methods in contact problems of the elasticity theory for bodies of cylindrical shape (1969). In the present paper, a contact problem of the elasticity theory on torsion of an infinite hollow cylinder by a rigid insert is investigated. The outer cylinder surface is rigidly fixed. The insert of a finite length is inside the cylinder. In 1971, this problem was formulated and analyzed by A.V. Belokon. He reduced it to an integral equation with respect to the unknown contact stress by using the Fourier integral transformation. A.V. Belokon derived a complete solution to this problem for the case of thick-walled cylinders when the kernel symbol of the integral equation can be approximated by the function corresponding to the torsion of the space with a cylindrical cavity. In the present paper, the case of thin-walled cylinders being complementary to Belokon's case is mainly considered.

Materials and Methods. The cylinder material is supposed to be linearly elastic. The method of integral transformations is used to solve the problem. The singular asymptotic method is applied to solve the integral equation.

Research Results. On the basis of studying the properties of the integral equation kernel symbol function, a new special easily factorable approximation applicable for any cylinder thickness is suggested. The Monte-Carlo method is used to determine optimal approximation parameters. Calculations are mainly made for thin-walled cylinders. As a result, an analytic asymptotical solution to the integral equation is obtained.

Discussion and Conclusions. The new solution can be effective for relatively long rigid inserts whose length is bigger than the internal diameter of the cylinder. The method based on new approximation remains applicable also for the cases when a cylinder can be regarded as a cylindrical shell. The asymptoti-

* Работа выполнена по гранту РФФИ 15-01-00331.
**E-mail: pozharda@rambler.ru, zolotov.nikita.borisovich@gmail.com
*** The research is done on RFFI grant no. 15-01-00331.

рекомендовать инженерам для анализа прочностных характеристик упругих деталей цилиндрической формы при кручении жестким вкладышем.

cal solution can be recommended to engineers for the strength analysis of elastic machine parts of the cylindrical form twisted by a rigid insert.

Ключевые слова: теория упругости, контактные задачи, полый цилиндр, кручение, аппроксимация.

Keywords: theory of elasticity, contact problems, hollow cylinder, torsion, approximation.

Введение. Контактные задачи о взаимодействии жесткого бандажа с бесконечным сплошным упругим цилиндром и о нормальном контакте жесткого вкладыша с поверхностью цилиндрической шахты в упругом пространстве рассматривались в работах [1–4]. При этом в сингулярном асимптотическом методе использовалась аппроксимация символа ядра интегрального уравнения в виде суммы двух легко факторизуемых функций, что позволяет найти только приближенное решение уравнения Винера-Хопфа [2]. Позже для этих же задач была предложена аппроксимация символа ядра одной легко факторизуемой функцией [5,6], что позволило существенно облегчить применение сингулярного асимптотического метода, который получил широкое распространение при решении задач со смешанными граничными условиями [7,8]. Анализируя научное наследие профессора А. В. Белоконя [9], сталкиваешься с еще одной интересной задачей, рассмотренной им в начале 70-х годов прошлого века. Это задача кручения жестким вкладышем полого цилиндра, которую тогда удалось эффективно решить лишь для толстостенного цилиндра [3, с. 230]. Цель настоящего исследования — получить решение этой задачи для тонкостенного цилиндра на основе сингулярного асимптотического метода и новой эффективной аппроксимации символа ядра интегрального уравнения.

Материалы и методы. В цилиндрических координатах рассмотрим контактную задачу кручения полого линейно-упругого цилиндра, внутренний радиус которого равен R, а внешний R_1. Внешняя поверхность цилиндра жестко закреплена. Внутрь цилиндра помещен жесткий цилиндрический вкладыш длины $2a$, к которому приложен крутящий момент M. Под действием этого момента упругий материал цилиндра в области контакта испытывает угловое перемещение $u_\varphi=-\varepsilon$. Материал цилиндра характеризуется модулем сдвига G. При заданных величинах R, R_1, a, ε требуется определить контактное напряжение $p(z)$ в области контакта. Затем может быть определен момент M. При помощи метода интегрального преобразования Фурье задача сводится к следующему интегральному уравнению ($|x| \le a$) [3]:

$$\int_{-a}^{a} p(z)K\left(\frac{x-z}{R}\right)dz = \pi G\varepsilon, \quad K(t) = \int_0^\infty L(u)\cos ut\,du, \tag{1}$$

где символ ядра имеет вид

$$L(u) = \frac{1-\omega^{-1}(u)\omega(\alpha u)}{uK_1^{-1}(u)[K_0(u)+I_0(u)\omega(\alpha u)]+2[1-\omega^{-1}(u)\omega(\alpha u)]}, \tag{2}$$

$$\omega(u) = \frac{K_1(u)}{I_1(u)}, \quad \alpha = \frac{R_1}{R} > 1.$$

Здесь $I_n(u)$, $K_n(u)$ — модифицированные функции Бесселя [10]. Безразмерный параметр α характеризует толщину стенок цилиндра. При $\alpha\to\infty$ функция $L(u)$ вида (2) стремится к функции

$$L_0(u) = \frac{1}{uK_1^{-1}(u)K_0(u)+2}, \tag{3}$$

соответствующей случаю кручения пространства с цилиндрической шахтой.

Ранее было установлено, что при $\alpha>3$ и $u\ge 0$ функция $L_0(u)$ вида (3) достаточно хорошо аппроксимирует функцию $L(u)$ и было получено полное решение уравнения (1) с символом ядра (3) [3]. Отметим, что наибольшее отличие этих функций наблюдается в нуле, где

$$L(0) = A = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\alpha^2}, \quad L_0(0) = \frac{1}{2}. \tag{4}$$

В бесконечности функция (2) имеет асимптотику:

$$L(u) = \frac{1}{u} - \frac{3}{2u^2} + o\left(\frac{1}{u^2}\right), \quad u \to +\infty. \tag{5}$$

Введем безразмерные обозначения

$$z' = \frac{z}{a}, \quad x' = \frac{x}{a}, \quad p'(z') = \frac{p(z)}{G}, \quad \varepsilon' = \frac{\varepsilon}{a}, \quad \lambda = \frac{R}{a}. \tag{6}$$

Штрихи далее будем опускать. Параметр λ характеризует относительную ширину области контакта. В обозначениях (6) уравнение (1) примет вид

$$\int_{-1}^{1} p(z) K\left(\frac{x-z}{\lambda}\right) dz = \pi\varepsilon. \qquad (7)$$

Для решения уравнения (7) применим сингулярный асимптотический метод [5,6], эффективный при достаточно малых значениях λ.

Результаты исследования. Получение решения задачи основано на сведении уравнения (7) к интегральному уравнению Винера–Хопфа, при решении которого используем новую аппроксимацию

$$L(u) \approx L_*(u) = \frac{\sqrt{u^2+B^2}}{u^2+C^2} \exp\left(-\frac{3}{2\sqrt{u^2+E^2}}\right) \frac{u^2+A_0^2G^2}{u^2+G^2}, \qquad (8)$$

при условиях

$$\frac{B}{C^2}\exp\left(-\frac{3}{2E}\right)A_0^2 = A, \quad E = 10. \qquad (9)$$

Аппроксимация (8), (9) учитывает поведение $L(u)$ в нуле и бесконечности, см. формулы (4), (5). Кроме того, функция (8) легко факторизуема. В табл. 1 для разных α даны значения параметров аппроксимации (8) и ее относительная погрешность θ (в процентах) при $u \geq 0$. Значения параметра C определялись из условия (9). Значение $\alpha=\infty$ соответствует аппроксимации предельной функции (3).
При проведении расчетов параметров аппроксимации использовался метод Монте-Карло.

Таблица 1
Table 1

Параметры аппроксимации

Approximation parameters

α	A_0	B	G	θ	α	A_0	B	G	θ
∞	1,970	0,8872	0,8447	2,0	1,07	0,4068	4,001	8,696	1,07
3	0,4649	5,651	4,674	0,5	1,06	0,1582	6,088	10,25	4
2	0,8586	1,150	3,340	0,5	1,05	1,251	5,091	4,580	4
1,5	2,192	4,183	3,631	0,3	1,04	1,448	5,002	4,924	4
1,1	3,165	6,887	8,878	2	1,03	1,400	6,991	6,876	4,5
1,09	1,269	6,582	10,09	3	1,02	2,082	5,909	7,875	5
1,08	2,037	6,583	9,164	3,5	1,01	2,715	6,507	9,500	5,5

Значение E специально выбрано большим (см. формулу (9)), поскольку в процессе получения сингулярного асимптотического решения используется еще одна аппроксимация в полуплоскости $\operatorname{Re} s > 0$:

$\exp(y(s)) \approx 1 + y(s)$, (10)

$$y(s) = \frac{3}{2\pi\sqrt{s^2-E^2}} \ln\frac{s+\sqrt{s^2-E^2}}{E}.$$

При выбранном значении E относительная погрешность аппроксимации (10) при действительных $s>0$ не превышает 0,3 %.

В результате применения метода Винера–Хопфа главный член асимптотического решения интегрального уравнения (7) при малых λ можно построить в форме

$p(x) = \frac{\varepsilon}{\lambda}\left[\psi\left(\frac{1+x}{\lambda}\right) + \psi\left(\frac{1-x}{\lambda}\right) - \frac{1}{A}\right]$ $(|x| \leq 1)$, (11)

$$\psi(s) = \frac{W(s)+I(s)}{\sqrt{A}}, \quad I(s) = \frac{3}{2\pi}\int_0^s W(s-\tau)K_0(E\tau)d\tau,$$

$$W(s) = \frac{\exp(-Bs)}{\sqrt{\pi s}} + \left(\frac{C}{\sqrt{B}} + \frac{1-A_0}{A_0^2}\right)\operatorname{erf}(\sqrt{Bs}) +$$

$$+\frac{(1-A_0)(A_0G-C)}{A_0^2\sqrt{B-A_0G}}\exp(-A_0Gs)\mathrm{erf}(\sqrt{(B-A_0G)s}).$$

Здесь erf(x) — интеграл вероятностей, На основании формулы (11) можно получить выражение для интегральной характеристики решения (момента M).

Как показывают расчеты, погрешность асимптотического решения (11) при $\lambda<1$ не превышает $(6+\theta)$%, где θ — погрешность аппроксимации (8).

Обсуждение и заключение. Аппроксимация вида (8) пригодна не только для тонкостенного цилиндра для цилиндра любой толщины (при любых значениях параметра α). Как правило, с уменьшением толщины цилиндра (с уменьшением α) погрешность θ возрастает. При значениях $\alpha\leq1{,}02$ цилиндр можно рассматривать не только в рамках теории упругости, но и в рамках теории цилиндрических оболочек (толщина оболочки обычно составляет не более двух процентов радиуса срединной поверхности). Приближенное аналитическое решение (11) можно рекомендовать инженерам для анализа прочностных характеристик деталей цилиндрической формы при кручении жесткой шайбой (вкладышем), когда длина шайбы $2a$ превышает внутренний диаметр цилиндра $2R$ (при этом $\lambda=R/a<1$).

Библиографический список

1. Aleksandrov, V. M. Asymptotic solution of a class of integral equations and its application to contact problems for cylindrical elastic bodies / V. M. Aleksandrov, A.V. Belokon’ // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 1967. — Vol. 31, No. 4.— P. 718–724.

2. Aleksandrov, V. M. Asymptotic solution of a class of integral equations encountered in the investigation of mixed problems of the mathematical physics for regions with cylindrical boundaries / V. M. Aleksandrov, A. V. Belokon’ // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 1968. — Vol. 32, No. 3.— P. 402–413.

3. Развитие теории контактных задач в СССР / под ред. Л. А. Галина. — Москва : Наука, 1976. — 493 с.

4. Александров, В. М. Контактные задачи в машиностроении / В. М. Александров, Б. Л. Ромалис. — Москва : Машиностроение, 1986. — 176 с.

5. Aleksandrov, V. M. An asymptotic method in contact problems / V. M. Aleksandrov, D. A. Pozharskii // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 1999. — Vol. 63, No. 2. — P. 283–290.

6. Alexandrov, V. M. Three-dimensional contact problems / V. M. Alexandrov, D. A. Pozharskii. — Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2001. — 406 p.

7. Davtyan, D. B. The action of a strip punch on a transversely isotropic half-space / D. B. Davtyan, D. A. Pozharskii // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 2012. — Vol. 76, No. 5. — P. 558–566.

8. Artamonova, E. A. A strip cut in a transversely isotropic elastic solid / E. A. Artamonova, D. A. Pozharskii // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 2013. — Vol. 77, No. 5. — P. 551–558.

9. Наседкин, А. В. Александр Владимирович Белоконь (1941–2013) / А. В. Наседкин, А. О. Ватульян, М. И. Карякин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2016. — № 4. — С. 128–129.

10. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. — Москва : Наука, 1979. — 832 с.

References

1. Aleksandrov, V. M., Belokon, A. V. Asymptotic solution of a class of integral equations and its application to contact problems for cylindrical elastic bodies. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1967, vol. 31, no. 4, pp. 718–724.

2. Aleksandrov, V. M., Belokon, A. V. Asymptotic solution of a class of integral equations encountered in the investigation of mixed problems of the mathematical physics for regions with cylindrical boundaries. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1968, vol. 32, no. 3, pp. 402–413.

3. Galin, L. A., ed. Razvitie teorii kontaktnykh zadach v SSSR. [Development of the theory of contact problems in the USSR.] Moscow: Nauka, 1976, 493 p. (in Russian).

4. Aleksandrov, V. M., Romalis, B.L. Kontaktnye zadachi v mashinostroenii. [Contact problems in mechanical engineering.] Moscow: Mashinostroenie, 1986, 176 p. (in Russian).

5. Aleksandrov, V. M., Pozharskii, D. A. An asymptotic method in contact problems. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1999, vol. 63, no. 2, pp. 283–290.

6. Alexandrov, V. M., Pozharskii, D. A. Three-dimensional contact problems. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2001, 406 p.

7. Davtyan, D. B., Pozharskii, D. A. The action of a strip punch on a transversely isotropic half-space. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2012, vol. 76, no. 5, pp. 558–566.

8. Artamonova, E. A., Pozharskii, D. A. A strip cut in a transversely isotropic elastic solid. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2013, vol. 77, no. 5, pp. 551–558.

9. Nasedkin, A. V., Vatulyan, A. O., Karyakin, M. I. Aleksandr Vladimirovich Belokon' (1941–2013). [Alexander Vladimirovich Belokon (1941 – 2013).] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Natural Sciences. 2016, no. 4, pp. 128–129 (in Russian).

10. Abramovits, M, Stigan, I., erd. Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam. [Reference on special functions.] Moscow: Nauka, 1979, 832 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 09.03.2017
Сдана в редакцию 09.03.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 09.03.2017
Submitted 09.03.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Пожарский Дмитрий Александрович,
заведующий кафедрой «Прикладная математика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6372-1866
pozharda@rambler.ru

Золотов Никита Борисович, студент кафедры «Прикладная математика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) ,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-2193-0616
zolotov.nikita.borisovich@gmail.com

Authors:

Pozharskii, Dmitry A.,
Head of the Applied Mathematics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6372-1866
pozharda@rambler.ru

Zolotov, Nikita B.,
student of the Applied Mathematics Department, Don State Technical University (RF, 344000, , Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-2193-0616
zolotov.nikita.borisovich@gmail.com

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.182; 519.632 10.23947/1992-5980-2017-17-2-12-22

Применение обобщенного метода точечных источников поля для решения краевых задач математической физики*

С. Ю. Князев[1], Е. Е. Щербакова[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Application of the generalized point source method for solving boundary value problems of mathematical physics ***

S. Yu. Knyazev [1], E. E. Shcherbakova [2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Целью работы является разработка нового универсального численного метода решения краевых задач для линейных уравнений эллиптического типа.
Материалы и методы. Предложенный метод основан на приведении исходного уравнения математической физики к более простому неоднородному уравнению с известным фундаментальным решением. Затем предлагается произвести переход к неоднородному интегральному уравнению с ядром, выражаемым через известное фундаментальное решение. Полученное интегральное уравнение совместно с граничными условиями решается численно. В результате было получено искомое приближенное решение, потенциал поля в аналитическом виде, что позволило не только находить приближенное значение потенциала поля в любой точке области решения, но и дифференцировать этот потенциал, причем без заметной потери точности. Это свойство разработанного численного метода выгодно отличает его от традиционных численных методов решения краевых задач, таких, например, как метод конечных элементов.
Результаты исследования. Для подтверждения эффективности предложенного численного метода решена двумерная и трехмерная краевые задачи с известными решениями. Получены зависимости погрешности численного решения от числа линейных уравнений в результирующей системе. Показано, что даже при небольшом числе уравнений в системе (порядка нескольких сотен) достигается точность решения на уровне сотых долей процента. Еще одной важной иллюстрацией эффективности предложенного метода является решение квантово-механической задачи для одномерного и двумерного квантового осциллятора. Показано, что рассматриваемый метод позволяет находить собственные значения энергии и собственные функции с приемлемой точностью. Разработанный численный метод позволяет существенно расширить область применения традиционного метода точечных источников поля при решении прикладных задач моделирования полей различной физической природы, включая задачи на собственные значения.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты подтверждают, что физическое поле, описываемое практически лю-

Introduction. The work objective is to develop a new universal numerical method for solving boundary value problems for linear elliptic equations.
Materials and Methods. The proposed method is based on the transformation of the original mathematical physics equation to a simpler inhomogeneous equation with the known fundamental solution. From this equation, the transition to an inhomogeneous integral equation with the kernel expressed by the known fundamental solution is carried out. The obtained integral equation with boundary conditions is solved numerically. An approximate solution, the field potential being in an analytical form, is resulted. That allows not only find an approximate value of the field potential at any point in the solutions domain, but also differentiate this potential, and all without perceptible loss of accuracy. This property of the developed numerical method sets it apart from the traditional numerical methods for solving boundary value problems, such as the finite element method.
Research Results. To confirm the effectiveness of the proposed numerical method, the two-dimensional and three-dimensional boundary value problems with the known solutions are solved. The dependences of the numerical solution error on the number of linear equations in the resulting system are obtained. It is shown that even at a small number of equations in the system (some hundreds) the solution accuracy is achieved at the level of hundredths of a percent. Another major illustration of the proposed method effectiveness is the solution to quantum mechanical problems for the one-dimensional and two-dimensional quantum oscillators. It is shown that the given method allows finding the energy eigenvalues and eigenfunctions with an acceptable accuracy. The developed numerical technique allows greatly extend the application domain of the traditional point source method in solving applied problems for modeling fields of different physical nature, including the eigenvalue problems.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: ksy@donpac.ru, sherbakovaee@mail.ru
***The research is done within the frame of independent R&D.

бым линейным уравнением эллиптического типа, можно представить в виде суперпозиции полей точечных источников, удовлетворяющих более простому уравнению, решение которого находится с помощью метода точечных источников поля. Таким образом, представленный в данной работе численный метод можно рассматривать как обобщенный метод точечных источников поля.

Discussion and Conclusions. The results obtained confirm that a physical field described by any linear elliptic equation can be represented as a superposition of point source fields satisfying a simpler equation, the solution of which is obtained through the method of point source of the field. Therefore, the numerical method presented in this paper can be considered as a generalized point source method.

Ключевые слова: фундаментальное решение, метод фундаментальных решений, метод точечных источников, уравнения эллиптического типа, краевая задача.

Keywords: fundamental solution, method of fundamental solutions, point source method, elliptic equations, boundary value problem.

Введение. Основными методами численного решения краевых задач для уравнений математической физики в настоящее время являются метод конечных элементов (МКЭ) и, в значительно меньшей степени, метод конечных разностей (МКР). Эти методы могут использоваться при решении практически любых линейных уравнений, что позволяет считать МКЭ и МКР универсальными методами решения краевых задач. Область применения других методов обычно ограничивается вполне определенными типами уравнений математической физики. Тем не менее, методам МКЭ и МКР присущи определенные недостатки. Это, например, недостаточно быстрая сходимость численного решения с уменьшением шага разностной сетки и обусловленная этим высокая погрешность результата. Определенные трудности возникают, если граничные условия содержат производную по нормали от искомой функции. Если кроме искомой функции необходимо определить и ее производные, то для этого необходимо производить численное дифференцирование, что также ведет к появлению дополнительной, весьма значительной погрешности. В связи с этим проблема поиска новых численных методов решения краевых задач продолжает оставаться актуальной.

Одним из эффективных методов решения краевых задач, который может являться альтернативой МКЭ и МКР, является метод точечных источников поля (МТИ) [1–5]. Этот метод может использоваться для решения широкого круга задач математической физики. Наиболее эффективно использование этого метода при решении краевых задач для уравнений эллиптического типа: Лапласа, Гельмгольца, бигармонического уравнения [6–12]. Имеются сведения о возможности и эффективности использования этого метода при решении краевых задач для уравнений параболического типа, для волновых уравнений [13–15], при моделировании полей упругих напряжений в деформированных твердых телах [16–20] и т. д.

Для МТИ характерны высокое быстродействие в сочетании с малой вычислительной погрешностью, а также простота компьютерной реализации. Для возможности использования МТИ необходимо располагать фундаментальными решениями исходного уравнения в аналитическом виде. Однако при решении некоторых задач математической физики фундаментальные решения неизвестны, что является препятствием для использования МТИ. Тем не менее, как показано в [21–22], имеется возможность получения фундаментальных решений численно, с последующим их применением в МТИ. С помощью подхода, используемого в [23–24], искомое решение краевой задачи было получено без предварительных вычислений фундаментальных решений. Это позволило значительно расширить область применения МТИ.

Интегральные уравнения для численного решения краевой задачи. Пусть в области Ω фундаментальное решение $g(r,R)$ уравнения $LU=0$ известно. Требуется найти решение краевой задачи для неоднородного уравнения

$$\left(L+l(r)\right)U(r)=f(r),\ r\in\Omega, \qquad (1)$$

с условиями на границе $\partial\Omega$:

$$\Lambda(r)U(r)=\phi(r),\ r\in\partial\Omega, \qquad (2)$$

где L, $l(r)$, $\Lambda(r)$ — линейные операторы в области Ω и на границе $\partial\Omega$.

Для определенности будем считать, что операторы $l(r)$ и $\Lambda(r)$ имеют вид:

$$l(r)=a(r)+B(r)\cdot\nabla,\ r\in\Omega,$$

$$\Lambda(r)=\alpha(r)+\beta(r)\frac{\partial}{\partial n},\ r\in\partial\Omega.$$

Здесь $a(r)$, $B(r)$, $\alpha(r)$, $\beta(r)$ — заданные скалярные и векторная функции в области Ω и на границе $\partial\Omega$, ∇ — оператор Гамильтона.

Ищем решение задачи (1)–(2) в виде:

$$U(r)=u(r)+v(r),$$

где функция $v(r)$ удовлетворяет однородному уравнению

$$Lv = 0\,, \tag{3}$$

а неизвестная функции $u(r)$ есть частное решение уравнения

$$Lu = f - l(r)u - l(r)v(r)\,,$$

правую часть которого $f - l(r)u - l(r)v = \rho(r)$ можно рассматривать как плотность $\rho(r)$ некоторого фиктивного заряда, распределенного в области Ω. Отсюда для функции $u(r)$ получаем интегральное уравнение

$$u(r) = \int g(r,R)\rho(R)\,d\Omega_R$$

или

$$u(r) = \int_\Omega g(r,R)\big(f(R) - l(R)v(R) - l(R)u(R)\big)\,d\Omega_R. \tag{4}$$

Для функции $v(r)$, как в МТИ, используется приближенное выражение

$$v(r) = \sum_{k=1}^{Nq} q_k g(r,\rho_k). \tag{5}$$

Здесь N_q — число точечных зарядов q_k, моделирующих поле, располагаемых в точках с координатами $\boldsymbol{\rho}_k$ за пределами области решения задачи Ω, вблизи ее границы.

Теперь уравнение (4) принимает вид:

$$u(r) = \int_\Omega g(r,R)\left(f(R) - l(R)\sum_{k=1}^{Nq} q_k g(R,\rho_k) - l(R)u(R)\right)d\Omega_R. \tag{6}$$

Если оператор $l(R)$ представляет собой скалярную функцию (это справедливо, если решается, например, стационарное уравнение Шредингера), то, вычисляя интеграл в правой части соотношения (6) численно, можно, как будет показано ниже, построить алгоритм для нахождения значений функции $u(r)$ в узловых точках области Ω. В более общем случае подействуем на уравнение (6) оператором $l(r)$. Введя при этом новую функцию $w(r) \equiv l(r)u(r)$, получим для этой неизвестной функции интегральное уравнение:

$$w(r) = \int_\Omega l(r)g(r,R)\left(f(R) - w(R) - l(R)\sum_{k=1}^{Nq} q_k g(R,\rho_k)\right)d\Omega_R. \tag{7}$$

Решая уравнение (7) численно находим функцию $w(r)$, после чего, используя уравнение (6), записанное в виде

$$u(r) = \int_\Omega g(r,R)\left(f(R) - l(R)\sum_{k=1}^{Nq} q_k g(R,\rho_k) - w(R)\right)d\Omega_R, \tag{8}$$

находим искомую функцию $u(r)$.

Пусть теперь $r \in \partial\Omega$. Подействуем на уравнение (8) при $r \in \partial\Omega$ оператором $\Lambda(r)$:

$$\Lambda(r)u(r) = \int_\Omega \Lambda(r)g(r,R)\left(f(R) - l(R)\sum_{k=1}^{Nq} q_k g(R,\rho_k) - w(R)\right)d\Omega_R.$$

Теперь граничное условие (2) можно записать в виде:

$$\int_\Omega \Lambda(r)g(r,R)\left(f(R) - l(R)\sum_{k=1}^{Nq} q_k g(R,\rho_k) - w(R)\right)d\Omega_R + \sum_{k=1}^{Nq} q_k \Lambda(r)g(r,\rho_k) = \phi(r),\ r \in \partial\Omega\,. \tag{9}$$

Соотношения (7)–(9) можно использовать для численного решения исходной краевой задачи. Построим алгоритм решения этой задачи.

Алгоритм численного решения краевой задачи. Область решения Ω разбивается на элементарные участки площадью (объемом), равным ω_j. Число таких участков обозначим как N_u. Внутри каждого участка выбираем точку, узел с координатой R_j. Некоторые из точек, узлов r_k=R_j, число которых N_G=N_q, располагаются на границе области решения. Теперь уравнение (7) принимает вид:

$$w(r) + \sum_{j=1}^{N_u} l(r)g(r,R_j)w(R_j)\omega_j = \sum_{j=1}^{N_u}\left(f(R_j) - \sum_{k=1}^{Nq} q_k l(R_j)g(R_j,\rho_k)\right)l(r)g(r,R_j)\omega_j. \tag{10}$$

Это уравнение должно выполняться во всех N_u узловых точках, включая N_G граничных узлов. Запишем уравнение (10) для каждого узла R_i. Получим:

$$w(R_i) + \sum_{j=1}^{N_u} l(R_i)g(R_i,R_j)w(R_j)\omega_j = \sum_{j=1}^{N_u} l(R_i)g(R_i,R_j)\left(f(R_j) - \sum_{k=1}^{Nq} q_k l(R_j)g(R_j,\rho_k)\right)\omega_j. \tag{11}$$

В результате получаем N_u уравнений для N_u+N_G неизвестных. Это N_u значений функции $w(r)$ в N_u узловых точках R_i, и N_q=N_G зарядов q_k, располагаемых в точках с координатами $\boldsymbol{\rho}_k$. Для получения замкнутой системы уравнений необходимо дополнить систему (11) уравнениями, учитывающими граничные условия для решаемой задачи. Для этого используем интегральное уравнение (9).

На границе $\partial\Omega$, в точках с координатами $\mathbf{r}_m$ располагаем граничные узловые точки, количество которых равно N_q=N_G. Заменяем приближенно интегралы в (9) интегральными суммами, как это сделано при получении соотношений (10), (11). В результате для каждого граничного узла получим уравнение:

$$\sum_{j=1}^{N_u}\Lambda(r_m)g(r_m,R_j)\left(f(R_j)-\sum_{k=1}^{Nq}q_k l(R_j)g(R_j,\rho_k)-w(R_j)\right)\omega_j+\sum_{k=1}^{Nq}q_k\Lambda(r_m)g(r_m,\rho_k)=\phi(r_m). \quad (12)$$

Решая объединенную систему уравнений (11), (12) находим N_u значений функции $w(r)$ в узловых точках области Ω, и N_G значений точечных зарядов q_k. Затем с помощью соотношения (8) вычисляем приближенное значение функции $u(r)$ в произвольной точке области Ω, и, обозначив $w(R_j)$ как w_j, а $f(R_j)$ как f_j, получаем искомое решение исходной задачи в виде соотношения:

$$U(r)=\sum_{j=1}^{N_u}g(r,R_j)\left(f_j-l(R_j)\sum_{k=1}^{Nq}q_k g(R_j,\rho_k)-w_j\right)\omega_j+\sum_{k=1}^{Nq}q_k g(r,\rho_k). \quad (13)$$

Следует обратить внимание на то, что соотношение (13) дает приближенное **аналитическое** выражение для искомой функции $U(r)$. Это значит, что с полученным решением $U(r)$ можно поступать как с любым другим аналитическим выражением. Его можно дифференцировать, интегрировать, производить другие действия, и при этом не возникает дополнительная численная погрешность. Например, частную производную по координате x от функции $U(r)$ можно вычислить с помощью формулы:

$$\frac{\partial U(r)}{\partial x}=\sum_{j=1}^{N_u}\frac{\partial g(r,R_j)}{\partial x}\left(f_j-l(R_j)\sum_{k=1}^{Nq}q_k g(R_j,\rho_k)-w_j\right)\omega_j+\sum_{k=1}^{Nq}q_k\frac{\partial g(r,\rho_k)}{\partial x}. \quad (14)$$

Аналогичным образом можно получить аналитические выражения для вычисления результатов других математических операций над функцией $U(r)$.

Решение тестовых задач. Ниже приводятся результаты решения тестовых задач, подтверждающих эффективность рассматриваемого метода при решении краевых задач для уравнений эллиптического типа. Сначала решалась двумерная краевая задача. В области Ω, представляющей собой квадрат со стороной L=2, центр которого совмещен с началом координат, решалась задача для уравнения

$$\Delta U(r)+2y^2\frac{\partial U(r)}{\partial x}+x^2\frac{\partial U(r)}{\partial y}+\sin(xy)U(r)=f(r),\ r\in\Omega \quad (15)$$

с условиями на границе $\partial\Omega$

$$U(r)+\frac{xy}{4}\frac{\partial U(r)}{\partial n}=\phi(r),\ r\in\partial\Omega. \quad (16)$$

Функции $f(r)$ и $\phi(r)$ в соотношениях (15), (16) подбирались таким образом, чтобы они соответствовали точному решению краевой задачи (15)–(16) в виде:

$$U(r)=U(x,y)=x^2+y+\sin(xy). \quad (17)$$

При решении краевой задачи оператору L в уравнении (1) соответствовал двумерный оператор Лапласа L=Δ и, соответственно, фундаментальное решение $g(r,R)$ имело вид:

$$g(r,R)=\frac{1}{2\pi}\ln|r-R|.$$

Оператору $l(r)$ в (1) соответствовал оператор $l(r)=2y^2\frac{\partial}{\partial x}+x^2\frac{\partial}{\partial y}+\sin(xy)$, а оператору $\Lambda(r)$ в (2) — оператор

$$\Lambda(r)=1+\frac{xy}{4}\frac{\partial}{\partial n}.$$

При численном решении краевой задачи (15)–(16) задавалось число N_0, определяющее равномерный шаг h сетки в области решения Ω. Точечные заряды q_k, моделирующие поле, равномерно располагались по периметру квадрата со стороной L_q=kL. Параметр k>1 определял удаленность зарядов от границ области решения. При этом слишком большое и слишком малое удаление зарядов, как и в стандартном варианте МТИ, нежелательны, так как это ведет к снижению точности решения задачи. Авторами при вычислениях использовалось k=1,3. Полное число узлов в области

Ω равнялось $N_u = N_0^2$, а количество точечных зарядов, моделирующих поле $N_q = 4(N_0-1)$. Таким образом, полное число уравнений в системе (11)–(12) составило $N_n = N_u + N_q = N_0^2 + 4(N_0-1)$.

После нахождения приближенного численного решения краевой задачи $U_N(r)$, при заданном полном числе уравнений $N=N_n$ в системе (11)–(12), оценивалась максимальная относительная погрешность решения ε_{max}. Для этого в области решения задачи случайным образом задавались координаты $\mathbf{z}_i$ точек, число которых полагалось равным $N_\varepsilon = 100$, после чего относительная погрешность вычислялась с помощью формулы

$$\varepsilon_{max} = \frac{\max_i \left| U_N(z_i) - U(z_i) \right|}{U_{max}},$$

где U_{max} — максимальное по абсолютной величине значение точного решения (17) в области Ω. Аналогичным образом, наряду с максимальной относительной погрешностью оценивалась и среднеквадратичная погрешность.

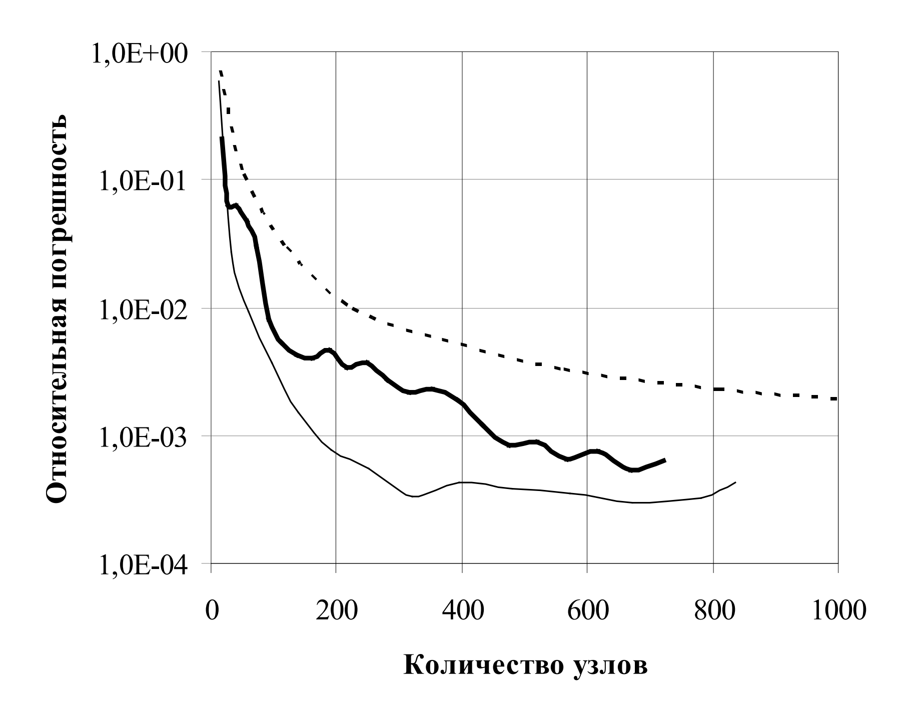


Рис. 1. Зависимость максимальной относительной погрешности численного решения от количества узлов при решении двумерной и трехмерной краевой задачи

Fig. 1. Dependence of maximum relative error of numerical solution of the number of nodes under solving two-dimensional and the three-dimensional boundary value problem

На рис. 1 представлена зависимость максимальной относительной погрешности от полного числа уравнений $N=N_n$ в системе (11)–(12) (жирная сплошная линия). С ростом числа N от начального значения $N=17$ до значения $N=721$ погрешность решения уменьшается более чем на два порядка, от $\varepsilon_{max}=2{,}1\cdot10^{-1}$ до $\varepsilon_{max}=7{,}5\cdot10^{-4}$.

Для получения системы (11)–(12) использовался простейший метод численного интегрирования, аналог метода прямоугольников. Можно предположить, что использование более точного метода численного интегрирования позволит повысить точность решения краевой задачи. Действительно, использование метода Гаусса с третьим порядком интегрирования позволило повысить точность численного решения почти на порядок. Это проиллюстрировано рис. 1, где тонкая сплошная линия представляет зависимость погрешности решения краевой задачи от числа уравнений N, рассчитанной при использовании метода Гаусса.

Далее решалась трехмерная задача Дирихле. В области Ω, представляющей собой куб со стороной $L=2$, центр которого совмещен с началом координат, решалась задача для уравнения

$$\Delta U(r) + 2y^2 \frac{\partial U(r)}{\partial x} + x^2 \frac{\partial U(r)}{\partial y} + \frac{\partial U(r)}{\partial z} + \sin(xy)U(r) = f(r),\ r \in \Omega . \tag{18}$$

Функции $f(r)$ в уравнении (18) и в правой части условия Дирихле подбирались таким образом, чтобы они соответствовали точному решению краевой задачи в виде:

$$U(r) = U(x, y, z) = x^2 + y + \sin(xy) - z. \quad (19)$$

При решении краевой задачи оператору L в уравнении (1) соответствовал трехмерный оператор Лапласа L=Δ и, соответственно, фундаментальное решение $g(r, R)$ имело вид

$$g(r, R) = -\frac{1}{4\pi|r - R|}.$$

Оператору $l(r)$ в (1) соответствовал оператор $l(r) = 2y^2 \frac{\partial}{\partial x} + x^2 \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} + \sin(xy)$, а оператору $\Lambda(r)$ в (2) соответствовал оператор $\Lambda(r) = 1$.

Пунктирная кривая на рис. 1 представляет зависимость относительной погрешности решаемой задачи Дирихле от размерности N, т. е. от числа уравнений в системе (11)–(12), для решения которой использовался аналог метода прямоугольников. Видно, что уже при относительно небольшой размерности численной задачи N=800 погрешность решения составляет $\varepsilon_{max}=2{,}0\cdot10^{-3}$. Можно предположить, что и в этом случае использование более точного метода численного интегрирования позволит снизить погрешность решения краевой задачи.

Решение стационарного уравнения Шредингера. Фундаментальное значение при решении квантово-механических задач имеет уравнение Шредингера [25]. Аналитические решения этого уравнения могут быть получены лишь для весьма ограниченного круга задач, преимущественно одномерных. Несмотря на широкий спектр имеющихся численных методов решения уравнения Шредингера, проблема эффективных способов нахождения собственных энергий и собственных функций для основного уравнения квантовой механики, особенно при решении многомерных задач, продолжает оставаться актуальной [23–24]. Предложенный численный метод может, в ряде случаев, использоваться при решении квантово-механических задач.

Пусть частица массой m совершает финитное движение в силовом поле $V(r)$. Запишем стационарное уравнение Шредингера в виде:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}E\psi = \frac{2m}{\hbar^2}V(r)\psi\ . \quad (20)$$

Необходимо, решая уравнение (20), найти собственные значения энергии E и соответствующие им собственные функции, волновые функции частицы $\psi(r)$.

При решении краевой задачи для уравнения Шредингера оператору L в уравнении (1) соответствует оператор Лапласа L=Δ, а оператор $l(r)$ в (1) есть скалярная функция $l(r) = \frac{2m}{\hbar^2}E - \frac{2m}{\hbar^2}V(r)$.

При реализации алгоритма решения уравнения Шредингера сначала задается энергия частицы E. Область решения для уравнения Шредингера Ω берется близкой, но несколько большей классически доступной для частицы области движения, границы которой определяются уравнением

$$V(r) = E\ . \quad (21)$$

Размеры области Ω подбираются таким образом, чтобы на ее границах волновая функция с заданной точностью равнялась нулю. Для получения нетривиального решения задается некоторая точка M внутри области Ω, например, на границе классически допустимой области движения, в которой значение волновой функции заведомо не равняется нулю. В этой точке значение волновой функции полагается равным единице: $\psi(M) = 1$. После получения решения волновую функцию можно легко перенормировать.

После численного решения задачи описанным выше способом проверяется найденное значение волновой функции в точке G. Если окажется, что с достаточной точностью выполняется условие $\psi(G) = 0$, то это означает, что заданное значение энергии E является собственным значением, а найденная волновая функция $\psi(r)$ является собственной функцией для данной энергии E. В противном случае подбираются такие два значения энергии E_1 и $E_2 > E_1$ при которых $\psi(G)$ имеет различные знаки. После этого собственное значение энергии в интервале (E_1, E_2) и собственная функция находятся, например, с помощью метода половинного деления. Иллюстрацией такого подхода является рис. 2, на котором представлен график зависимости функции $\mathrm{sign}(\psi(G))$ от значения квантового числа n для одномерного квантового осциллятора.



Рис. 2. Зависимость знака волновой функции в граничной точке G от значения квантового числа n

Fig. 2. Dependence of wave function sign at boundary point G on the value of quantum number n

Как известно, собственные значения одномерного квантового осциллятора определяются выражением $E = \hbar\omega\left(n+\frac{1}{2}\right)$, где ω — частота осциллятора, а квантовое число n принимает целочисленные значения, начиная с нуля. Как продемонстрировано на рис. 2, вблизи целочисленных значений n знак $\psi(G)$ изменяется с положительного (при меньших n) на отрицательное (при больших n). Вблизи такого перехода можно подобрать значение $n=n_N$, при котором $\psi(G)$ с приемлемой точностью равняется нулю. Величина Δn отклонения n_N от целочисленного значения определяет погрешность для численного значения собственной энергии.

На рис. 2 также изображены переходы от отрицательных значений $\psi(G)$ к положительным. По мере приближения к такому переходу значение $\psi(G)$ резко возрастает по абсолютной величине, но не обращается в ноль. Поэтому такие переходы не соответствуют собственным значениям энергии.

Точность в определении собственных значений энергии увеличивается с ростом размерности N системы линейных уравнений, к которой приводится численная задача для уравнения Шредингера. Наибольшая точность, естественно, наблюдается при решении одномерной задачи Шредингера. Например, относительная погрешность ΔE при вычислении первого собственного значения энергии одномерного осциллятора изменялась от значения 0,15 при N=20 до значения 0,00025 при N=120. При решении двумерных и трехмерных задач точность вычислений значительно снижается. На рис. 3 представлены зависимости относительной погрешность ΔE для собственных значений энергии двумерного осциллятора от размерности N численной задачи. Жирная сплошная линия на рис. 3 соответствует основному, нулевому энергетическому уровню, тонкая сплошная линия — второму энергетическому уровню, пунктирная линия — четвертому энергетическому уровню. При решении двумерной задачи относительная погрешность порядка нескольких процентов легко достижима. Можно ожидать, что использование более точного метода численного интегрирования, как и в предыдущем случае, позволит повысить точность численного решения квантово-механической задачи.

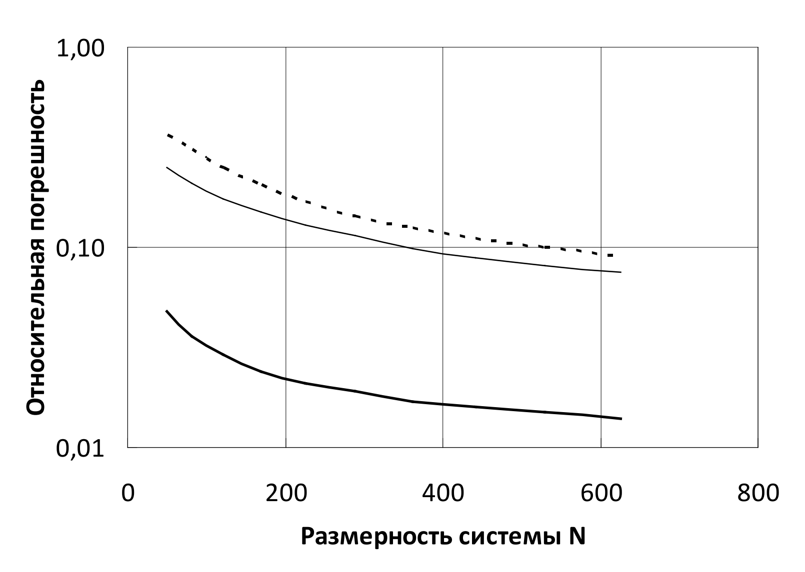


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности от размерности системы уравнений для трех собственных значений энергии двумерного осциллятора

Fig. 3. Dependence of relative error on dimensionality of system of equations for three energy eigenvalues of two-dimensional oscillator

Описанный алгоритм численного решения стационарных квантово-механических задач не зависит от их размерности. Решение может несколько усложниться при наличии вырождения энергетических уровней, когда одному собственному значению энергии соответствует несколько собственных функций. Например, при решении задачи для двумерного квантового осциллятора собственные значения энергии определяются двумя квантовыми числами n_x и n_y: $E = E_x + E_y = \hbar\omega\left(n_x + n_y + 1\right)$. При численном решении краевой задачи область решения Ω, в соответствии с (21), задается в виде прямоугольника, несколько большего классически доступной для частицы области движения, с соотношением сторон $\frac{L_x}{L_y} = \sqrt{\frac{n_x + 1/2}{n_y + 1/2}}$. Отсюда следует, что, например, первый энергетический уровень с $n = n_x + n_y = 1$ дважды вырожден. Этому энергетическому уровню соответствуют две собственные функции, рассчитываемые при $n_x = 1,\ n_y = 0$ и $n_x = 0,\ n_y = 1$, и при соотношении сторон $\frac{L_x}{L_y} = \sqrt{3}$ и $\frac{L_x}{L_y} = \sqrt{\frac{1}{3}}$. При другом соотношении сторон получается смешанное состояние.

Заключение. Полученные результаты показывают, что физическое поле, описываемое практически любым линейным уравнением эллиптического типа $\left(L + l\left(r\right)\right)U\left(r\right) = f\left(r\right)$ можно представить в виде суперпозиции полей точечных источников, удовлетворяющих более простому уравнению $LU\left(r\right) = f\left(r\right)$, решение которого находится с помощью МТИ. Поэтому разработанный численный метод можно рассматривать как обобщенный метод точечных источников поля (ОМТИ). Решение тестовых задач подтверждает эффективность ОМТИ при решении достаточно сложных краевых задач, включая трехмерные задачи и задачи на собственные значения, в том числе квантово-механические. Существенным преимуществом ОМТИ по сравнению с традиционными методами численного решения краевых задач, таких как МКР или МКЭ, является возможность получения решения в аналитическом виде, что позволяет производить с этим решением соответствующие математические операции без потери точности. Численные эксперименты показали, что погрешность для производных по координатам имеет тот же порядок точности, что и погрешность для искомого потенциала.

Библиографический список

1. Fairweather G. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems / G. Fairweather, A. Karageorghis // Ad. Vol. Comput. Math. – 1998. – Vol. 9. – P. 69-95.

2. Alves C.J.S. A new method of fundamental solutions applied to nonhomogeneous elliptic problems / C.J.S. Alves, C.S. Chen // Advances in Computational Mathematics. – 2005. – Vol. 23 – P. 125-142.

3. Бахвалов, Ю. А. Погрешность метода точечных источников при моделировании потенциальных полей в областях с различной конфигурацией / Ю. А. Бахвалов, С. Ю. Князев, А. А. Щербаков, Е. Е. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2012. — № 5. — С. 17–21.

4. Князев, С. Ю. Сравнительный анализ двух вариантов метода коллокаций при численном моделировании потенциальных полей / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова, А. Н. Заиченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2014. — № 1. — С. 17–19.

5. Князев, С. Ю. Компьютерное моделирование потенциальных полей методом точечных источников / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова, А. А. Щербаков. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2012. — 156 с.

6. Князев, С. Ю. Устойчивость и сходимость метода точечных источников поля при численном решении краевых задач для уравнения Лапласа / С. Ю. Князев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2010. — № 1. — С. 3–12.

7. Князев, С. Ю. Решение трехмерных краевых задач для уравнений Лапласа с помощью метода дискретных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2015. — № 5. — С. 25–30.

8. Князев, С. Ю. Численное решение краевых задач для уравнения Пуассона методом точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова, А. А. Енгибарян // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2 (77). — С. 15–20.

9. Князев, С. Ю. Численное решение уравнений Пуассона и Гельмгольца с помощью метода точечных источников / С. Ю. Князев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2007. — № 2. — С. 77–78.

10. Князев, С. Ю. Численное решение краевых задач для неоднородных уравнений Гельмгольца методом точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова, А. Н. Заиченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2014. — № 4. — С. 14–19.

11. Князев, С. Ю. Применение метода точечных источников поля при численном решении задач на собственные значения для уравнения Гельмгольца / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2016. — № 3 (545). — С. 11–17.

12. Щербакова, Е. Е. Решения задач на собственные значения для уравнения Гельмгольца методом точечных источников поля / Е. Е. Щербакова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 3 (86). — С. 87–95.

13. Князев, С. Ю. Решение задач тепло- и массопереноса с помощью метода точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Технические науки. — 2006. — № 4. — С. 43–47.

14. Князев, С. Ю. Численное исследование стабильности термомиграции плоских зон / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2007. — № 1. — С. 14–19.

15. Лунин, Л. С. Исследование стабильности термомиграции ансамбля линейных зон с помощью трехмерной компьютерной модели, построенной на основе метода точечных источников поля / Л. С. Лунин, С. Ю. Князев, Б. М. Середин, А. С. Полухин, Е. Е. Щербакова // Вестник Южного научного центра. — 2015. — Т. 11, № 4. — С. 9–15.

16. Liviu Marin The MFS–MPS for two-dimensional steady-state thermoelasticity problems / Liviu Marin, Andreas Karageorghis // Eng. Anal. Bound. Elem. - 2013. - Vol. 37. Iss. 7–8. - P. 1004-1020.

17. Yan Gu Improved singular boundary method for elasticity problems / Yan Gu, Wen Chen, Xiaoqiao He // Comput. & Structures. – 2014. - Vol. 135. - P. 7–82.

18. Князев, С. Ю. Моделирование полей упругих деформаций с применением метода точечных источников / С. Ю. Князев, В. Н. Пустовойт, Е. Е. Щербакова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 1 (80). — С. 29–38.

19. Князев, С. Ю. Моделирование трехмерных полей упругих деформаций с помощью метода точечных источников / С. Ю. Князев, В. Н. Пустовойт, Е. Е. Щербакова, А. А. Щербаков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 4 (83). — С. 13–23.

20. Князев, С. Ю. Математическое моделирование полей упругих деформаций методом точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова, А. А. Щербаков // Математические методы в технике и технологиях. — 2015. — № 5 (75). — С. 21–23.

21. Князев, С. Ю. Применение численных фундаментальных решений в методе точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 4 (87). — С. 118–125.

22. Князев, С. Ю. Метод численного решения стационарного уравнения Шредингера / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2016. — Т. 59, № 10. — С. 87–92.

23. Князев, С. Ю. Интегральное уравнение для численного решения стационарных квантово-механических задач / С. Ю. Князев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 3 (86). — С. 79–86.

24. Ландау, Л. Д. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Москва : Наука, 1963. — 703 с.

References

1. Fairweather, G., Karageorghis, A. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems. Advances in Computational Mathematics, 1998, vol. 9, pp. 69–95.

2. Alves, C.-J.-S., Chen, C.-S. A new method of fundamental solutions applied to nonhomogeneous elliptic problems. Advances in Computational Mathematics, 2005, vol. 2, pp. 125–142.

3. Bakhvalov, Y.A., et al. Pogreshnost' metoda tochechnykh istochnikov pri modelirovanii potentsial'nykh poley v oblastyakh s razlichnoy konfiguratsiey. [Errors of Point Source Method under Simulation of Potential Fields in Areas with Different Shape Configuration.] Russian Electromechanics, 2012, no. 5, pp. 17–21 (in Russian).

4. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E., Zaichenko, A.N. Sravnitel'nyy analiz dvukh variantov metoda kollokatsiy pri chislennom modelirovanii potentsial'nykh poley. [A Comparative Analysis of Two Variants of the Collocation in Numerical Modeling of Potential Fields.] Russian Electromechanics, 2014, no. 1, pp. 17–19 (in Russian).

5. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E., Shcherbakov, A.A. Komp'yuternoe modelirovanie potentsial'nykh poley metodom tochechnykh istochnikov. [Computer modeling of potential fields by point-source method.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2012, 156 p. (in Russian).

6. Knyazev, S.Yu. Ustoychivost' i skhodimost' metoda tochechnykh istochnikov polya pri chislennom reshenii kraevykh zadach dlya uravneniya Laplasa. [Stability and Convergence of Point-Source Field Method at Numerical Solution to Boundary Value Problems for Laplace Equation.] Russian Electromechanics, 2010, no. 3, pp. 3–12 (in Russian).

7. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Reshenie trekhmernykh kraevykh zadach dlya uravneniy Laplasa s pomoshch'yu metoda diskretnykh istochnikov polya. [The Decision of the Three-Dimensional Boundary Value Problems for the Laplace Equation Using the Method of Discrete Sources of the Field.] Russian Electromechanics, 2015, no. 5, pp. 25–30 (in Russian).

8. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E., Yengibaryan, A.A. Chislennoe reshenie kraevykh zadach dlya uravneniya Puassona metodom tochechnykh istochnikov polya. [Numerical solution to boundary problems for Poisson equation by point-source method.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 2 (77), pp. 15–20 (in Russian).

9. Knyazev, S.Yu. Chislennoe reshenie uravneniy Puassona i Gel'mgol'tsa s pomoshch'yu metoda tochechnykh istochnikov. [Numerical solution to Poisson and Helmholtz equations using point source method.] Russian Electromechanics, 2007, no. 2, pp. 77–78 (in Russian).

10. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E., Zaichenko, A.N. Chislennoe reshenie kraevykh zadach dlya neodnorodnykh uravneniy Gel'mgol'tsa metodom tochechnykh istochnikov polya. [Numerical Solution of the Boundary Problems with Non-Homogeneous Helmholtz Equation by Field Point-Source Method.] Russian Electromechanics, 2014, no. 4, pp. 14–19 (in Russian).

11. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Primenenie metoda tochechnykh istochnikov polya pri chislennom reshenii zadach na sobstvennye znacheniya dlya uravneniya Gel'mgol'tsa. [The Numerical Eigenvalue Problems Solution for the Helmholtz Equation Using the Point Sources Method] Russian Electromechanics, 2016, no. 3 (545), pp. 11–17 (in Russian).

12. Shcherbakova, E.E. Resheniya zadach na sobstvennye znacheniya dlya uravneniya Gel'mgol'tsa metodom tochechnykh istochnikov polya. [Solving eigenvalues problems for Helmholtz equation by point-source method.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 3 (86), pp. 87–95 (in Russian).

13. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Reshenie zadach teplo- i massoperenosa s pomoshch'yu metoda tochechnykh istochnikov polya. [The solution of heat and mass transfer problems by the point source method.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2006, no. 4, pp. 43—47 (in Russian).

14. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Chislennoe issledovanie stabil'nosti termomigratsii ploskikh zon. [Numerical study of stability of flat bands thermomigration.] Russian Electromechanics, 2007, no. 1, pp. 14–19 (in Russian).

15. Lunin, L.S., et al. Issledovanie stabil'nosti termomigratsii ansamblya lineynykh zon s pomoshch'yu trekhmernoy komp'yuternoy modeli, postroennoy na osnove metoda tochechnykh istochnikov polya. [The study of stability of thermomigration of an ensemble of linear zones using a three-dimensional computer model constructed on the basis of the field point sources method.] Vestnik SSC RAS, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 9–15 (in Russian).

16. Martin, Liviu, Karageorghis, Andreas. The MFS–MPS for two-dimensional steady-state thermoelasticity problems. Anal. Bound. Elem. 2013, vol. 37, iss. 7–8, pp. 1004-1020.

17. Yan Gu, Wen Chen, Xiaoqiao He. Improved singular boundary method for elasticity problems. Comput. & Structures, 2014, vol. 135, pp. 7–82.

18. Knyazev, S.Yu., Pustovoyt, V.N., Shcherbakova, E.E. Modelirovanie poley uprugikh deformatsiy s primeneniem metoda tochechnykh istochnikov. [Modeling the elastic strain fields by point-source method.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 1(80), pp. 29—38 (in Russian).

19. Knyazev, S.Yu. , et al. Modelirovanie trekhmernykh poley uprugikh deformatsiy s pomoshch'yu metoda tochechnykh istochnikov.[Modeling of three-dimensional elastic strain fields by point-source method.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 4 (83), pp. 13–23 (in Russian).

20. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E., Shcherbakov, A.A. Matematicheskoe modelirovanie poley uprugikh deformatsiy metodom tochechnykh istochnikov polya. [Mathematical modeling of elastic deformation fields by field point source method.] Mathematical Methods in Engineering and Technologies-MMTT, 2015, no. 5 (75), pp. 21–23 (in Russian).

21. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Primenenie chislennykh fundamental'nykh resheniy v metode tochechnykh istochnikov polya. [Application of the numerically obtained fundamental solutions in the field point-source method.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 4 (87), pp. 118–125 (in Russian).

22. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Metod chislennogo resheniya statsionarnogo uravneniya Shredingera. [Method for Numerical Solution of the Stationary Schrödinger Equation.] Russian Physics Journal, 2017, vol. 59, no. 10, pp. 87–92 (in Russian).

23. Knyazev, S.Yu. Integral'noe uravnenie dlya chislennogo resheniya statsionarnykh kvantovo-mekhanicheskikh zadach. [Integral equation for numerical solution of stationary quantum-mechanical problems.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 3 (86), pp. 79–86 (in Russian).

24. Landau, L.D., Lifshits, E.M. Kvantovaya mekhanika. Nerelyativistskaya teoriya. [Quantum Mechanics. Nonrelativistic theory.] Moscow: Nauka, 1963, 703 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.03.2017
Сдана в редакцию 10.03.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 10.03.2017
Submitted 10.03.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Князев Сергей Юрьевич,
заведующий кафедрой «Математика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8607-3416
ksy@donpac.ru

Щербакова Елена Евгеньевна,
доцент каф. «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-9239-1955
Sherbakovaee@mail.ru

Authors:

Knyazev, Sergey Yu.,
Head of the Mathematics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), associated professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8607-3416
ksy@donpac.ru

Shcherbakova, Elena E.,
associate professor of the Material Physics and Applied Hylology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand. Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-9239-1955
Sherbakovaee@mail.ru

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.83-585.862:519.87 10.23947/1992-5980-2017-17-2-23-30

Механико-математическая модель неуравновешенности нежесткой карданной передачи*

О. А. Полушкин[1], О. О. Полушкин[2], И. М. Фофана[3]**
[1,2,3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Mechanical-mathematical model of unbalanced non-rigid gimbal gear ***

O. A. Polushkin[1], O. O. Polushkin[2], I. M. Fofana[3]**
[1,2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена разработке оригинальной механико-математической модели неуравновешенности карданной передачи с учетом изгибной податливости ее оси. Целью работы является создание новой высокоадекватной модели неуравновешенности основной нежесткой высокооборотной карданной передачи. Данная модель представляется эффективным средством решения задач балансировки при проектировании, изготовлении и ремонте автомобилей.
Материалы и методы. Описательное содержание модели неуравновешенности передачи представлено в виде совокупности допущений. На их основе построены формализованные схемы модели неуравновешенности нежесткой карданной передачи до и после приведения ее во вращение. Эти схемы представляют двухопорную модель и модель — фрагмент многоопорной карданной передачи. С использованием имеющихся в литературе соотношений определены: дополнительный упругий прогиб оси вращающейся передачи от исходного технологического прогиба ее оси по первой собственной форме; коэффициент изменения стрелы упругого прогиба; дисбаланс от упругого прогиба оси нежесткой карданной передачи.
Результаты исследования. Разработаны новые математические модели неуравновешенности карданной передачи. С их помощью могут быть определены начальные и корректирующие дисбалансы в плоскостях коррекции передачи, идеально сбалансированной на низкой скорости и приведенной во вращение с эксплуатационной скоростью. Рассмотрено действие установленных в плоскостях коррекции корректирующих дисбалансов при балансировке передачи на эксплуатационной скорости вращения. В этой связи разработан способ определения коэффициента изменения стрелы упругого прогиба оси вращения передачи. Определено значение стрелы прогиба оси вращения нежесткой карданной передачи.
Обсуждение и заключения. С помощью полученных результатов и соотношений с высокой достоверностью могут выполняться: обоснование нормативов точности балансировки передачи; анализ ее эксплуатационной неуравновешенности; классификация основных карданных передач автомобилей по критерию «гибкость»; формализация решения проектных задач балансировки карданной передачи и другие задачи обеспечения уравновешенности этой передачи в эксплуатации.

Introduction. The paper is devoted to the development of an ingenious mechanical-mathematical model of the unbalanced non-rigid gimbal gear with account for its axis flexibility. The work objective is to create a new highly adequate model of the imbalance of the basic non-rigid high-speed gimbal drive as an efficient means to solve the problems of balancing under car designing, manufacturing and servicing.
Materials and Methods. The descriptive content of the model of the unbalanced transmission is presented as a set of allowances. Formalized schemes of the model of the non-rigid gimbal gear imbalance before and after driving it into rotation are built on their basis. These schemes represent a double-beat model and a model- fragment of the multiple-bearing gimbal gear. Using the relations available in the literature, the following is determined: additional elastic deflection of the axis of the rotating transmission from the initial technological deflection of its axis according to the first eigenform; the coefficient of the elastic deflection modification; and the imbalance of the elastic deflection of non-rigid cardan shaft axles.
Research Results. New mathematical models of the cardan transmission imbalance are developed. They help to determine the initial and compensating imbalances in the transmission correction planes perfectly balanced at low speed and driven into rotation at an operating speed. The effect of the compensating imbalances established in the correction planes is considered when balancing the transmission at the operating rotation speed. In this connection, a method for determining the coefficient of change in the elastic deflection of the gear rotation axis is developed. The value of the deflection of the rotation axis of the non-rigid gimbal gear is determined.
Discussion and Conclusions. With the help of the obtained results and relations, the following can be performed with high reliability: the substantiation of the standards of accuracy of the transmission balancing; the analysis of its operational imbalance; the classification of the basic car cardan gears by the “flexibility” criterion; the formalization of the solution to the design tasks of the gimbal gear balancing and to other problems of ensuring the balance of this transmission in operation.

*Работа выполнена по договору № 89-12Н от 27.01.2012 г.
**E-mail: grunt@mail.ru, nazyroo@mail.ru, oop@enset.ru
***The research is done within the frame of Contract no. 89-12Н , 27.01.2012.

Ключевые слова: нежесткая карданная передача, гибкость, неуравновешенность, моделирование.

Keywords: non-rigid gimbal gear, flexibility, imbalance, modeling.

Введение. В практике для любого ротора (в том числе карданной передачи) характерна динамическая неуравновешенность, представляемая как совокупность статической и моментной неуравновешенности. В производстве неуравновешенность возникает вследствие анизотропии масс деталей ротора, погрешностей их изготовления и сопряжения при сборке. В процессе эксплуатации неуравновешенность обусловлена износом деталей ротационного агрегата, накоплением в нем технологических отходов.

Если несовпадение главной центральной оси инерции (ГЦОИ) ротационного агрегата с осью его вращения (ОВ) определять как неуравновешенность, следует количественно ее оценивать следующим образом: эксцентриситетом $\overline{e}$ массы ротора (радиус-вектор центра масс ротора относительно ОВ) и углом α между ГЦОИ и ОВ ротора [1, 2, 3]. Непосредственно измерить характеристики $\overline{e}$ и α у реальных роторов невозможно, поэтому их неуравновешенность моделируется с помощью понятия «дисбаланс» $\overline{D}$ [3, 4, 5]

$$\overline{D} = D \cdot e^{i\varphi_D} = m_н \cdot \overline{\rho} = m_н \cdot \rho \cdot e^{i\varphi_\rho} = m_н \cdot \rho \cdot e^{i\varphi_D}, \quad (1)$$

где $D = m_н.\rho$ — значение дисбаланса, обусловленного наличием неуравновешенной массы $m_н$ (в г) на расстоянии (в мм) эксцентриситета ρ (расстояние центра этой массы от оси вращения ротора), г·мм; φ_D — угол дисбаланса $\overline{D}$ в системе координат, связанной с ротором, рад; $\varphi_\rho = \varphi_D$ — угол вектора $\overline{\rho}$ эксцентриситета неуравновешенной массы $m_н$, рад.

Для жестких ротационных агрегатов машин, имеющих эксплуатационную $n_э$ и критическую $n_{кр1}$ частоты вращения в соотношении $n_э << n_{кр1}$, неуравновешенность $\{\overline{N}\}$ описывается двумя типами моделей. Первый:

$$\{\overline{N}\}_1 = \{\overline{D}_{cm} \quad \overline{M}_D\} = \{D_{cm} \quad \varphi_{Dcm} \quad M_D \quad \varphi_{MD}\}, \quad (2)$$

где $\overline{D}_{cm}$ — главный вектор дисбалансов ротора; $\overline{M}_D$ — главный момент дисбалансов ротора; D_{cm}, φ_{cm} — значение и угол $\overline{D}_{cm}$; M_D, φ_{MD} — значение и угол $\overline{M}_D$.

Второй:

$$\{\overline{N}\}_2 = \{\overline{D}_I \quad \overline{D}_{II}\} = \{D_I \quad \varphi_I \quad D_{II} \quad \varphi_{II}\}, \quad (3)$$

где $\overline{D}_I, \overline{D}_{II}$ — дисбалансы в двух произвольных плоскостях I, II, перпендикулярных оси вращения ротора (плоскости приведения по [1]), которые могут проходить и через опоры ротора; D_I, φ_I — значение и угол дисбаланса $\overline{D}_I$; D_{II}, φ_{II} — значение и угол дисбаланса $\overline{D}_{II}$.

Модели (2), (3) эквивалентно описывают неуравновешенность жесткого ротора. Переход от одной модели к другой выполняется их преобразованиями, представленными в [4, 5, 6]. Характерно, что компоненты векторов $\{\overline{N}\}_1, \{\overline{N}\}_2$ для жестких роторов практически не зависят от частоты их вращения как при балансировке, так и в эксплуатации.

Представленные выше модели (2), (3) могут быть использованы только для низкооборотных карданных передач с $n_э \leq 500$ мин$^{-1}$ << $n_{кр1}$. Такие передачи не используются в качестве основных [7] карданных передач автомобилей.

Для современных автомобилей, имеющих $n_э$ = 1500…10000 мин$^{-1}$, модели (2), (3) могут описывать неуравновешенность карданной передачи лишь при определенной частоте ее вращения. С изменением последней компоненты существенно меняются векторы $\{\overline{N}\}_1, \{\overline{N}\}_2$. Поэтому принципиально модели неуравновешенности высокооборотной карданной передачи автомобиля, как и любого нежесткого ротора, представляются следующим образом:

$$\{\overline{N}(\omega)\}_1 = \{\overline{D}_{cm}(\omega) \quad \overline{M}_D(\omega)\} = \{D_{cm}(\omega) \quad \varphi_{Dcm}(\omega) \quad M_D(\omega) \quad \varphi_{MD}(\omega)\}, \quad (4)$$

$$\{\overline{N}(\omega)\}_2 = \{\overline{D}_I(\omega) \quad \overline{D}_{II}(\omega)\} = \{D_I(\omega) \quad \varphi_I(\omega) \quad D_{II}(\omega) \quad \varphi_{II}(\omega)\}. \quad (5)$$

Для таких карданных передач, как и для любого нежесткого ротора, характеристики неуравновешенности по (4), (5) обусловлены двумя независимыми факторами [7]. Первый фактор — локальные дисбалансы от погрешностей исполнения деталей, сборки и монтажа на машине карданной передачи. Эти дисбалансы не зависят от частоты n вращения ротора на балансировочном станке или на машине. Их совокупность можно свести к характеристикам модели (3) неуравновешенности, имеющей независимые от n компоненты. Второй фактор — дисбалансы от изгиба оси ротора, которые зависят от n и представляются компонентами вектора $\{\overline{N}(\omega)\}_2$ по (5).

Учитывая отмеченные факторы, а также результаты исследований [8, 9], можно утверждать следующее. Необходимо создание высокоадекватной модели неуравновешенности высокооборотной карданной передачи автомобиля как нежесткого ротора. На основе данной модели карданные передачи будут классифицированы по критерию

«гибкость». При этом для каждого из выделенных классов будет возможно решение полного комплекса задач балансировки при проектировании, изготовлении и ремонте.

Постановка задачи. Как отмечено в [10], моделирование позволяет изучать влияние на рассматриваемый объект различных решений или выборов, не прибегая к его конструированию, изготовлению и испытаниям. Это особенно важно для анализа неуравновешенности и проектного синтеза уравновешенной конструкции ротационного агрегата вообще и основной карданной передачи автомобиля в частности, т. к. невозможно непосредственно измерить ее характеристики.

Моделирование неуравновешенности карданной передачи включает:

— создание механико-математической модели передачи, наиболее адекватно описывающей ее неуравновешенное состояние;

— непосредственное моделирование неуравновешенности и балансировки (разработка методик анализа неуравновешенности и синтеза уравновешенной конструкции с помощью построенной модели неуравновешенности).

Первой задачей моделирования является описательное содержание модели [11], включающее принятие аргументированных допущений, учитывающих основные конструктивные особенности карданной передачи как объекта балансировки, источники неуравновешенности и их особенности.

На основе описательного содержания решаются задачи построения формализованной схемы неуравновешенности карданной передачи и ее механико-математической модели [11]. При формировании последней:

— определяются свойства, параметры и характеристики модели, ее входные управляющие и возмущающие воздействия, а также реакции (выходы) модели;

— устанавливаются связи между ними.

Представленные ниже решения выполнены на методологической основе, разработанной в Донском государственном техническом университете на кафедре «Теория механизмов и машин» для нежестких роторов сельскохозяйственных машин [8, 9] с учетом специфики основных карданных передач автомобилей — объектов исследования настоящей работы.

Описательное содержание модели. Модель неуравновешенности высокооборотной карданной передачи строится с использованием перечисленных ниже допущений.

1. Рассматривается идеальная передача без люфтов в сопряжениях элементов карданов и компенсирующих устройств.

2. Погрешности исполнения элементов карданной передачи (валов, карданов, компенсирующих устройств, фланцев крепления) и их сопряжений создают множество локальных дисбалансов, имеющих постоянные углы и значения, не зависящие от угловой скорости ω вращения передачи.

3. Двухопорная карданная передача в сборе (карданный вал + 2 кардана + компенсирующее устройство + фланцы крепления) представляется однородным гладким цилиндром. Его длина l равна расстоянию (в м) между опорами. Масса $m = m_0 l$ равна расчетной массе передачи в сборе, где m_0 — линейная плотность (кг/м). Модуль упругости материала карданного вала — E (в Па). Момент инерции сечения в центре пролета — I (в м^4).

4. Многоопорные (число опор $n > 2$) карданные передачи различных типов являются совокупностью отдельных $(n-1)$ описанных выше двухопорных передач, представляемых как фрагменты исходной передачи. Поэтому дальнейшие исследования будем проводить только для модели двухопорной передачи, используя их результаты для исследования каждого из фрагментов многоопорной передачи.

5. Ось вращения (ОВ) карданной передачи представим как прямую, соединяющую центры ее опор. Используем введенное в [8] понятие «линия эксцентриситетов масс ротора (ЛЭМР)». Это геометрическое место центров масс множества элементарных сечений тела невращающегося ротора, перпендикулярных его ОВ. При разложении ЛЭМР в ряд по собственным формам изгиба учитываем лишь первую (основную) собственную форму искривления ЛЭМР со стрелой $\overline{y}_{max}$ в центре пролета между опорами карданной передачи. Как установлено в [8], у невращающегося однородного цилиндра первая собственная форма искривления ЛЭМР создает наибольший дисбаланс

$$\overline{D}_0 = \frac{5}{8} m \overline{y}_{max} \qquad (6)$$

в центральной плоскости приведения (в центре между опорами).

6. Рассматривая $\overline{y}_{max}$ как результат исходного искривления ОВ карданной передачи по первой собственной форме, заметим, что с приведением передачи во вращение со скоростью ω значение стрелы прогиба ОВ увеличится до $\overline{Y}_{max}(ω)$ за счет проявления $\overline{D}_0$. В результате произойдет приращение значения D_0, которое будет тем больше, чем большее значение имеет ω. Таким образом, исходное искривление ОВ карданной передачи по первой собственной форме со стрелой $\overline{y}_{max}$ при вращении приведет к возникновению у передачи зависящего от ω главного вектора дисбалансов

$$\overline{D}_0(ω) = \frac{5}{8} m \overline{Y}_{max}(ω). \qquad (7)$$

7. При низкочастотной балансировке карданной передачи ($n_б \ll n_э < n_{кр1}$) пренебрегаем дополнительным прогибом ОВ на скорости $\omega_б = \pi n_б/30$ вращения передачи на балансировочном станке, полагая $\overline{y}_{max}(\omega_б) \approx \overline{y}_{max}$, $\overline{D}_0(\omega_б) \approx \overline{D}_0$. В теоретических исследованиях такую балансировку будем полагать идеальной, считая остаточные дисбалансы в плоскостях коррекции равными нулю.

8. Как принято для нежестких ротационных агрегатов сельхозмашин в [8, 9], для основных карданных передач автомобилей полагаем, что упругие деформации ОВ передачи от действия неуравновешенных усилий подчиняются закону Гука, а жесткость карданного вала одинакова во всех направлениях, перпендикулярных ОВ. Это позволяет считать модель передачи линейной и использовать в исследованиях принцип суперпозиции.

Теоретический анализ. На рис. 1 представлены формализованные схемы модели неуравновешенности основной карданной передачи автомобиля, обобщающие рассмотрение ее как жесткой ($n_э \ll n_{кр1}$) и нежесткой роторной системы.

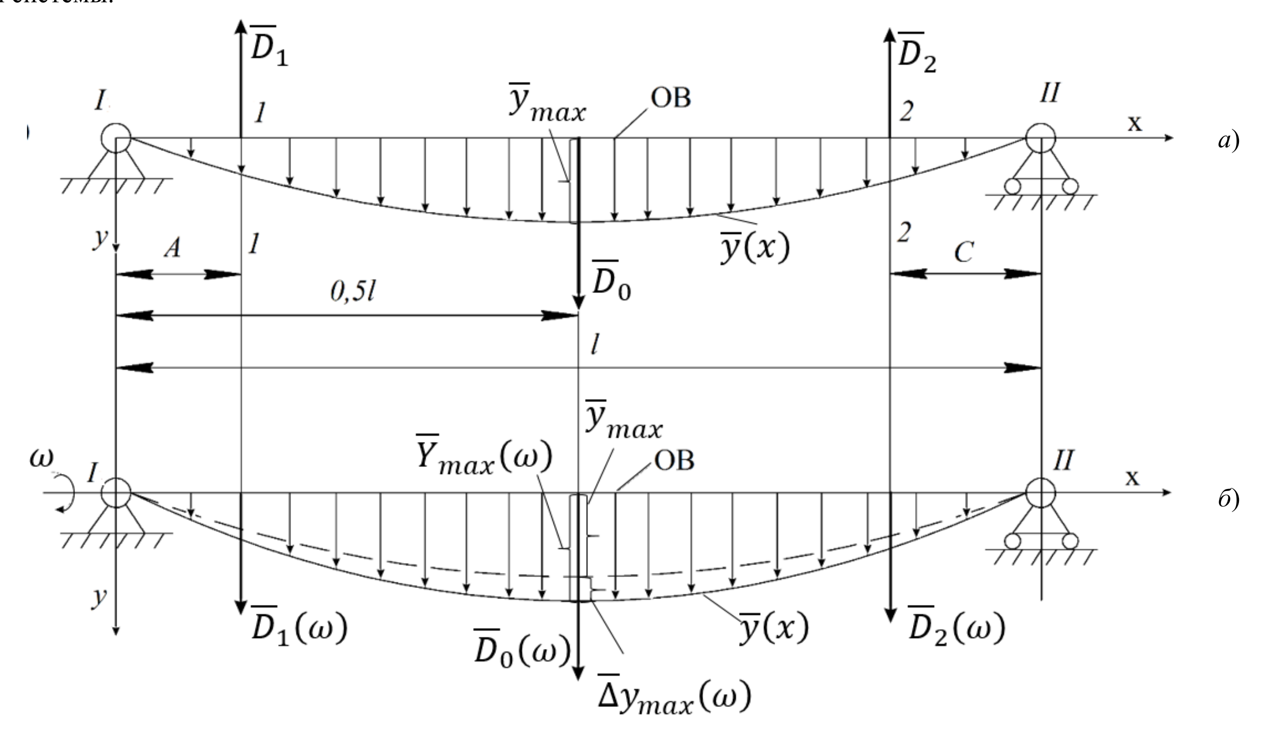


Рис. 1. Формализованные схемы обобщенной модели неуравновешенности карданной передачи

Fig. 1. Formalized schemes of the generalized model of unbalanced cardan transmission

Эти схемы практически полностью идентичны моделям неуравновешенности нежесткого ротора сельхозмашины из [8, 9], как и моделям неуравновешенности любого нежесткого ротора. Они представляют модель двухопорной карданной передачи, а также фрагмента многоопорной передачи. Представленные на рис. 1 векторы дисбалансов $\overline{D}_i$, i = 0,1,2 условно показаны расположенными в одной плоскости.

Рис. 1, *а* иллюстрирует формализованную схему модели неуравновешенности невращающейся передачи, на которой представлены:

— дисбалансы $\overline{D}_1, \overline{D}_2$ в плоскостях коррекции 1–1, 2–2, отстоящих от опор I, II на расстояния *A* и *C* соответственно;

— исходное искривление $\overline{y}(x)$ ОВ по первой собственной форме со стрелой $\overline{y}_{max}$, создающее неравномерно распределенные по кривой $\overline{y}(x)$ дисбалансы с интенсивностью $d\overline{D}(x) = m_0\overline{y}(x)dx$, приводящиеся к главному вектору дисбалансов $\overline{D}_0$, определенному по (6).

Отмеченные выше дисбалансы $\overline{D}_1, \overline{D}_2, \overline{D}_0$ описывают неуравновешенное состояние невращеющейся передачи. Они же описывают неуравновешенное состояние вращающейся с частотой $n \leq n_э$ карданной передачи, представляемой как жесткая роторная система, если $n_э \ll n_{кр1}$. Если корректирующие дисбалансы $\overline{D}_{к1}, \overline{D}_{к2}$ измеряются в плоскостях коррекции 1–1, 2–2, то при любой частоте балансировки $n_б \leq n_э$ их значения составят

$$\overline{D}_{к1} = -\overline{D}_1 - \overline{D}_0\frac{0,5l-C}{l-A-C}; \; \overline{D}_{к2} = -\overline{D}_2 - \overline{D}_0\frac{0,5l-A}{l-A-C}. \quad (8)$$

Жесткая передача $\overline{D}_{к1}$ *и* $\overline{D}_{к2}$ по (8) обеспечивает уравновешенность на машине при любой частоте вращения $n \leq n_э$.

Рис. 1, *б* иллюстрирует формализованную схему модели неуравновешенности нежесткой карданной передачи, вращающейся на балансировочном станке или на машине с угловой скоростью ω. Как результат проявления дисбаланса от исходного искривления ОВ со стрелой $\overline{y}_{max}$ при вращении передачи возникает дополнительное искривление ОВ по первой собственной форме со стрелой $\Delta\overline{y}_{max}(\omega)$, сонаправленной с $\overline{y}_{max}$. Поэтому результирующий изгиб ОВ вращающейся передачи по первой собственной форме будет иметь стрелу

$$\overline{Y}_{max}(\omega) = \overline{y}_{max} + \Delta\overline{y}_{max}(\omega). \quad (9)$$

В результате возникнет главный вектор дисбалансов $\overline{D}_0(\omega)$, определенный по (7). При этом дисбалансы $\overline{D}_1(\omega)$, $\overline{D}_2(\omega)$ и корректирующие дисбалансы $\overline{D}_{к1}(\omega)$, $\overline{D}_{к2}(\omega)$ в плоскостях коррекции 1–1, 2–2, измеренные на балансировочном станке при $\omega = \omega_б$, определяются:

$$\overline{D}_1(\omega_б) = \overline{D}_1 + \overline{D}_0(\omega_б)\frac{0{,}5l-C}{l-A-C};\ \overline{D}_2(\omega_б) = \overline{D}_2 + \overline{D}_0(\omega_б)\frac{0{,}5l-A}{l-A-C};$$
$$\overline{D}_{к1}(\omega_б) = -\,\overline{D}_1(\omega_б);\ \overline{D}_{к2}(\omega_б) = -\,\overline{D}_2(\omega_б). \quad (10)$$

С установкой $\overline{D}_{к1}(\omega_б)$, $\overline{D}_{к2}(\omega_б)$ по (10) в плоскостях коррекции 1–1, 2–2 карданной передачи будет обеспечена уравновешенность этой передачи только на частоте $\omega = \omega_б$. С приведением этой передачи во вращение при $\omega \neq \omega_б$ измерительная система балансировочного станка зафиксирует сонаправленные дисбалансы в плоскостях коррекции 1–1, 2–2, возникающие от изменения $\Delta\overline{y}_{max}(\omega)$ с вариацией ω. С приближением значения ω к $\omega_{кр1}$ существенно увеличивается $\Delta\overline{y}_{max}(\omega)$, обеспечивая большие показатели $\overline{Y}_{max}(\omega)$ по (9) и $\overline{D}_0(\omega)$ по (7). Их оценка будет проведена ниже при решении задач моделирования неуравновешенности.

Балансировка основных карданных передач автомобилей производится на частотах $n_б \ll n_э$, поэтому изложенное выше подтверждает отмеченную в [7, 12] недопустимость решения задач их балансировки как для жестких роторных систем.

Собственные свойства модели неуравновешенности карданной передачи (или ее фрагмента) определяются в первую очередь ее параметрами и характеристиками l, A, C, m_0, E, I, раскрытыми выше. К ним необходимо отнести также:

— максимальную эксплуатационную частоту $n_э$ вращения;

— класс точности балансировки передачи (по [6, 13] рекомендован 5-й класс точности с критериями качества $(e\omega)_{min}\ldots(e\omega)_{max}$ = 6,3…16 мм/с$^{-1}$);

— максимальные значения (в мм) зазоров Z_1, Z_2 сопряжений передачи с другими элементами конструкции автомобиля (например, с КПП и дифференциалом);

— норматив искривления $y_{пр}$ заготовки карданного вала.

Для трубы, используемой в качестве карданного вала, ГОСТ 5005-82 [14] регламентирует предельное отклонение Δ_m от прямолинейности на любом участке трубы длиной 1 м:

— Δ_m = 0,4 мм — для труб обычной точности;

— Δ_m = 0,25 мм — для труб повышенной точности;

— Δ_m = 0,15 мм — для труб высокой точности.

Поэтому предельное возможное значение прогиба этого вала

$$y_{пр} = \Delta_m \cdot l, \quad (11)$$

где l — в мм.

Входные управляющие воздействия определяются числом и значениями частот $n_б$ балансировки передачи. На этих частотах замеряются характеристики $\overline{A}_i$ колебаний опор (i = I, II) фрагмента модели передачи на балансировочном станке. С помощью полученных данных определяются характеристики неуравновешенности $\overline{D}_1, \overline{D}_2, \overline{D}_0$ (см. рис. 1, *а*) невращающейся передачи с целью последующей их корректировки.

К возмущающим воздействиям относятся:

— не зависящие от ω дисбалансы привода балансировочного станка (могут быть определены и скорректированы при настройке балансировочного станка);

— дисбалансы монтажа карданной передачи автомобиля, обусловленные погрешностями сопряжений передачи с другими элементами конструкции автомобиля (имеют пренебрежимо малое в сравнении с допустимыми дисбалансами значение).

Учитывая вышесказанное, возмущающими воздействиями модели неуравновешенности основной карданной передачи автомобиля пренебрегаем.

Используя материалы [8, 9], установим взаимосвязи входных воздействий, собственных свойств и выходов модели неуравновешенности карданной передачи, рассматриваемой в общем случае как нежесткая роторная система. Так, с помощью полученных теоретических и экспериментально подтвержденных в [8, 9] соотношений определим

$\Delta\overline{y}_{max}(\omega)$ — дополнительный упругий прогиб ОВ передачи с приведением ее во вращение со скорость ω (см. рис. 1, *б*):

$$\Delta\overline{y}_{max}(\omega)=\overline{y}_{max}\frac{a}{1-a}\,,a=0{,}01\,\frac{\omega^2 m_0 l^4}{EI}=\beta\omega^2, \quad (12)$$

$$\text{где }\ \beta=0{,}01\,\frac{m_0 l^4}{EI}=\left(\omega_{кр1}\right)^{-2} \quad (13)$$

— расчетная величина, обратная квадрату первой критической скорости $\omega_{кр1}$ вращения передачи.

Определяя по (9) стрелу результирующего изгиба ОВ передачи при скорости ω ее вращения, получаем

$$\overline{Y}_{max}(\omega)=\overline{y}_{max}\frac{1}{1-a}=\overline{y}_{max}\frac{1}{1-\beta\omega^2}\,. \quad (14)$$

Используя (7), находим

$$\overline{D}_0(\omega)=\frac{5}{8}m\overline{y}_{max}\frac{1}{1-\beta\omega^2}, \quad (15)$$

где $\overline{y}_{max}$, как и ранее, обозначает стрелу исходного (до приведения во вращение) искривления ОВ передачи по первой собственной форме изгиба, а $m=m_0 l$ — масса карданной передачи в сборе.

Необходимо заметить, что в исследованиях [8, 9] при создании модели неуравновешенности нежесткого ротора учитывался дополнительный прогиб его ОВ от действия дисбалансов, корректирующих $\overline{D}_0(\omega)$ в плоскостях коррекции у опор.

Рассматривая модель карданной передачи (см. рис.1, *а*) по соотношениям, представленным в [8, 9], находим корректирующие дисбалансы:

$$\overline{D}_{к1}^{пр}(\omega)=\frac{5}{8}\cdot\frac{m\overline{y}_{max}}{1-a}\cdot\frac{1}{1+b}\cdot\frac{0{,}5l-C}{l-A-C}\,,$$
$$\overline{D}_{к2}^{пр}(\omega)=\frac{5}{8}\cdot\frac{m\overline{y}_{max}}{1-a}\cdot\frac{1}{1+b}\cdot\frac{0{,}5l-A}{l-A-C} \quad (16)$$

в плоскостях коррекции 1–1, 2–2, ликвидирующие дисбалансы передачи от прогиба (исходного и упругого) ОВ.

В последнем выражении

$$b=\frac{5}{96}\cdot\frac{m\omega^2}{EI}\cdot\frac{A(0{,}5l-C)\left(\frac{3}{4}l^2-A^2\right)+C(0{,}5l-A)\left(\frac{3}{4}l^2-C^2\right)}{l-A-C} \quad (17)$$

— коэффициент изменения стрелы упругого прогиба ОВ передачи от действия установленных в плоскостях коррекции 1–1, 2–2 корректирующих дисбалансов по (16) при балансировке передачи на скорости ω.

Используя те же источники, находим

$$\overline{Y}_{max}(\omega)=\overline{y}_{max}\frac{1}{1-a}\cdot\frac{1}{1+b} \quad (18)$$

— стрела прогиба ОВ нежесткой карданной передачи, сбалансированной на скорости ω и приведенной во вращение с этой скоростью.

Изложенные выше методики и соотношения позволяют учесть упругие изгибные свойства основной высокооборотной карданной передачи автомобиля и связанные с этим характеристики ее неуравновешенности.

Выводы. Рассмотренные формализованные схемы модели неуравновешенности основной карданной передачи автомобиля и соотношения (8)–(18) представляют собой механико-математическую модель неуравновешенности нежесткой основной карданной передачи автомобиля. С помощью данной модели решаются следующие задачи моделирования неуравновешенности и балансировки:
— обоснование нормативов точности балансировки;
— анализ эксплуатационной неуравновешенности карданной передачи, сбалансированной на частоте $n_б \ll n_э$;
— классификация основных карданных передач автомобилей по критерию «гибкость»;
— формализация решения проектных задач балансировки карданной передачи автомобиля.

Библиографический список

1. Балансировка вращающихся тел. Термины : ГОСТ 19534-74 / Государственный комитет стандартов Совета министров СССР. — Москва : Издательство стандартов, 1974. — 45 с.

2. Ден-Гартог, Дж.-П. Механические колебания / Дж.-П. Ден-Гартог. —Москва : Физматгиз, 1960. —580 с.

3. Холфман, Р.-Л. Динамика / Р.-Л. Холфман. — Москва : Наука, 1972. — 568 с.

4. Справочник по балансировке / М. Е. Левит [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1992. — 464 с.

5. Полушкин, О. А. Теоретические основы балансировки роторов / О. А. Полушкин, В. А. Фокин // Типовые методы определения дисбалансов. Метод. указания. Вып. 1. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1994. — 30 с.

6. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения : ГОСТ Р 22061 / Государственный комитет стандартов Совета министров СССР. — Москва : Издательство стандартов, 1976. — 22 с

7. Малаховский, Я. Э. Карданные передачи / Я. Э. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденеев. — Москва : Машгиз. — 1962. — 160 с.

8. Полушкин, О. О. Балансировка нежестких роторов / О. О. Полушкин // Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2011. — 158 с.

9. Полушкин, О. О. Обеспечение качества балансировки и эффективности функционирования нежестких ротационных агрегатов сельскохозяйственных машин : дис. … канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону, 2005. — 164 с.

10. Честнат, Г. Техника больших систем (средства системотехники) / Г. Честнат. — Москва : Энергия, 1969. — 656 с.

11. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. — Москва : Наука, 1978. — 400 с.

12. Rzeppa, A.-H. Universal joint drives / A.-H. Rzeppa // Machine Design. — 1953. — Vol. 25. — P. 162.

13. ГОСТ ИСО 1940-1—2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2008. — 22 с.

14. ГОСТ 5005-82. Трубы стальные электросварные холоднодеформированные для карданных валов / Государственный комитет СССР по стандартам. — Переиздание с изменением. — Москва : Издательство стандартов, 1992. — 9 с.

References

1. Balansirovka vrashchayushchikhsya tel. Terminy: GOST 19534-74. [State standard 19534-74. Balancing of rotating bodies. Terms.] USSR State Standards Committee. Moscow: Standartinform, 1974, 45 p. (in Russian).

2. Den Hartog, J.P. Mekhanicheskie kolebaniya. [Mechanical vibrations.] Moscow: Fizmatgiz, 1960, 580 p. (in Russian).

3. Hoffman, R.L. Dinamika. [Dynamics.] Moscow: Nauka, 1972, 568 p. (in Russian).

4. Levit, M.E., et al. Spravochnik po balansirovke. [Reference guide to balancing.]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 464 p. (in Russian).

5. Polushkin, O.A., Fokin, V.A. Teoreticheskie osnovy balansirovki rotorov. [Theoretical background for rotor balancing.] Tipovye metody opredeleniya disbalansov. Metod. ukazaniya. Vyp. 1. [Standard methods of determining imbalances. Method. Instructions. Iss. 1.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1994, 30 p. (in Russian).

6. Mashiny i tekhnologicheskoe oborudovanie. Sistema klassov tochnosti balansirovki. Osnovnye polozheniya: GOST R 22061. [State standard R 22061. Machines and technological equipment. Balance quality grade system. General.] USSR State Standards Committee. Moscow: Standartinform, 1976, 22 p. (in Russian).

7. Malakhovskiy, Y.E., Lapin, A.A., Vedeneev, N.K. Kardannye peredachi. [Gimbal gear.] Moscow: Mashgiz, 1962, 160 p. (in Russian).

8. Polushkin, O.O. Balansirovka nezhestkikh rotoov. [Flexible rotor balancing.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2011, 158 p. (in Russian).

9. Polushkin, O.O. Obespechenie kachestva balansirovki i effektivnosti funktsionirovaniya nezhestkikh rotatsionnykh agregatov sel'skokhozyaystvennykh mashin : dis. … kand. tekhn. nauk. [Maintenance of balancing quality and operation efficiency of flexible rotary aggregates of agricultural machines: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2005, 164 p. (in Russian).

10. Chestnut, H. Tekhnika bol'shikh sistem (sredstva sistemotekhniki. [Large systems engineering (means of systems engineering).] Moscow: Energiya, 1969, 656 p. (in Russian).

11. Buslenko, N.P. Modelirovanie slozhnykh sistem. [Modeling complex systems.] Moscow: Nauka, 1978, 400 p. (in Russian).

12. Rzeppa, A.-H. Universal joint drives. Machine Design, 1953, vol. 25, p. 162.

13. GOST ISO 1940-1—2007. Vibratsiya. Trebovaniya k kachestvu balansirovki zhestkikh rotorov. [GOST ISO 1940-1—2007. Vibration. Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state. Part 1. Specification and verification of balance tolerances.] CIS Council for Standardization, Metrology and Certification; Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2008, 22 p. (in Russian).

14. GOST 5005-82. Truby stal'nye elektrosvarnye kholodnodeformirovannye dlya kardannykh valov. [State standard 5005-82. Steel electrically welded cold-deformed tubes for cardan shafts. Specifications.] Revised ed. USSR State Standards Committee. Moscow: Standartinform, 1992, 9 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.01.2017
Сдана в редакцию 11.01.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 11.01.2017
Submitted 11.01.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Полушкин Олег Алексеевич,
профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4070-8121
grunt@mail.ru

Полушкин Олег Олегович,
доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-8046-917X
grunt@mail.ru

Фофана Исмаель Масму,
аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0003-4504-9492
nazyroo@mail.ru

Authors:

Polushkin, Oleg A.,
professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4070-8121
grunt@mail.ru

Polushkin, Oleg O.,
associate professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-8046-917X
grunt@mail.ru

Fofana, Ismael M.,
postgraduate student of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0003-4504-9492
nazyroo@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9 + 621.2.082.18 10.23947/1992-5980-2017-17-2-31-37

Оценка трибоэлектрических характеристик быстрорежущих сталей *

А. А. Рыжкин[1], Е. В. Фоминов[2], Ю. А. Тороп[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Estimation of triboelectric properties of high-speed steels***

A. A. Ryzhkin[1], E. V. Fominov[2], Y. A. Torop[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена прогнозированию эксплуатационных свойств существующих и вновь разрабатываемых быстрорежущих сталей в зависимости от их химического состава путём изучения термодинамических процессов в зоне трения при резании и получения аналитических зависимостей для оценки характеристик трения и износа. Целью настоящей работы является прогнозирование износостойкости быстрорежущих сталей по структурно-чувствительным параметрам абсолютной или относительной термо-ЭДС материала и энтропии, которая может быть рассчитана по правилу аддитивности при известном химическом составе.

Материалы и методы. Установлена теоретическая зависимость между изменением энтропии сталей и их термо-ЭДС, согласно которой большему значению энтропии материала соответствует меньшее значение абсолютной ЭДС, что было проверено на различных марках быстрорежущих сталей.

Результаты исследования. С целью выявления связи между энтропией, как термоэлектрической характеристикой быстрорежущих сталей, и их износостойкостью были проведены испытания на трение цилиндрических образцов быстрорежущих сталей различных марок и стойкостные исследования свёрл при обработке стали 45. Произведены измерения относительных термо-ЭДС этих марок и рассчитаны их абсолютные значения. В результате испытаний наибольшую износостойкость показали быстрорежущие стали с высокими значениями энтропий и минимальными значениями абсолютных (относительных) термо-ЭДС.

Обсуждение и заключения. Установлена связь между параметрами износостойкости быстрорежущих сталей и их структурно–чувствительными характеристиками на микроуровне — энтропией и абсолютной термо-ЭДС. Для снижения износа при трении и резании необходимо применять марки быстрорежущих сталей с максимальной энтропией и минимальной термо-ЭДС .

Энтропию, которая без особых затруднений рассчитывается по известному химическому составу материала, можно использовать как для оценки эксплуатационных свойств существующих, так и для прогнозирования износостойкости вновь разрабатываемых марок быстрорежущих сталей.

Introduction. The paper is devoted to forecasting the operational properties of the existing and newly developed high speed steels depending on their chemical composition by the investigation of thermodynamic processes in the friction zone under cutting, and by receiving analytical dependences for evaluating friction and wear characteristics. The work objective is the prediction of wear resistance of high speed steels on the base of the structural sensitive parameters of the absolute or relative thermo-EMF and entropy of the material which can be calculated by the additivity rule at the known chemical composition.

Materials and Methods. The theoretical relationship between the change in entropy of steels and their thermo-EMF is obtained. According to it, a smaller value of the absolute thermo-EMF corresponds to a larger value of the material entropy. This theoretical relationship is experimentally tested on various compositions of high speed steels.

Research Results. To determine the relationship between entropy as a thermoelectric characteristic of high speed steels and their wear resistance, experimental tests on friction for the cylindrical samples of high speed steels of different types, and study on the wear properties of drills under steels machining are carried out. Measurements of relative thermo-EMF of these samples are performed; and their absolute values are calculated. The results of these tests show maximum wear resistance of high-speed steels having high values of entropy and low values of the absolute (relative) thermo-EMF.

Discussion and Conclusions. The relationship between the wear resistance parameters of high speed steels and their structurally-sensitive characteristics at the micro-level – entropy and absolute thermo-EMF, is established. To reduce wear during friction and cutting, it is necessary to apply the types of high speed steels with maximal entropy and minimal thermo-EMF. Entropy, which with ease can be calculated on the known chemical composition of the material, can be used to assess the operating properties and to predict the wear resistance of both existing and newly developed compositions of high speed steels.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: ryzhkin.anatolia@yandex.ru, fominoff83@mail.ru, yuriy.torop87@mail.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.

Ключевые слова: инструментальные режущие материалы, быстрорежущие стали, термо-ЭДС, энтропия, износостойкость, высокоэнтропийные быстрорежущие стали.

Keywords: tool cutting materials, high speed steels, thermo-EMF, entropy, wear resistance, high entropy quick-speed steels.

Введение. Среди основных современных тенденций повышения эксплуатационных характеристик инструментальных режущих материалов можно выделить такое направление, как создание новых марок быстрорежущих сталей (БРС), усложнение их химического состава введением новых легирующих элементов. В этом случае важно уметь прогнозировать свойства существующих и вновь разрабатываемых БРС в зависимости от их химического состава путём изучения термодинамических процессов в зоне трения при резании и получения аналитических зависимостей для оценки характеристик трения и износа.

Наиболее важным эксплуатационным свойством лезвийных инструментов, в том числе изготовленных из БРС, является их износостойкость. Интенсивность изнашивания БРС можно оценить по зависимости, полученной на основе уравнения баланса энтропии [1,2], из которой следует вывод о том, что износ при трении и резании будет меньше у материалов с наибольшим значением энтропии.

Теоретические предпосылки. Для оценки и прогнозирования износостойкости можно использовать структурно-чувствительный параметр микроуровня — абсолютную термо-ЭДС материала ε, которая, как известно из теории термоэлектрических явлений [3–6], есть энтропия движущихся носителей тока — электронов S_e и может быть определена как отношение теплоты переноса Q_e к абсолютной температуре T:

$$S_e = \frac{Q_e}{T}$$

По аналогичной зависимости определяется и тепловая энтропия S как функция термодинамического состояния материала. Поэтому можно предположить наличие функциональной связи между тепловой энтропией материала S и его абсолютной термо-ЭДС. В работе [7] для оценки изменения потенциала Гиббса ΔG реакции используется ЭДС гальванического элемента Е и аналитическая зависимость для определения ΔG:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E$$

Но изменение потенциала Гиббса ΔG материала определяется как

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

В результате

$$\Delta H - T \cdot \Delta S = -n \cdot F \cdot E$$

Откуда

$$E = -\frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{F \cdot n}, \qquad (1)$$

где F — число Фарадея, n — число электронов.

Полученная зависимость устанавливает связь между изменением энтропии материала ΔS и его термо-ЭДС E: большему значению энтропии материала соответствует меньшее значение его ЭДС при допущении, что процесс совершается при неизменных энтальпии ΔH и температуре T.

Энтропии БРС разных марок рассчитываются по правилу аддитивности [8] в зависимости от их химического состава по формуле:

$$S_{i,j} = \eta_i \cdot S_i + \eta_j \cdot S_j$$

где S_i и S_j — энтропия каждого компонента сплава, $\eta_{i,j}$ — мольная доля каждого компонента, $\sum \eta_{i,j} = 1$. Результаты расчётов представлены в таблице 1 (графа 3).

Теоретическая зависимость (1) и вытекающие из нее выводы были проверены на различных инструментальных режущих материалах. На рис. 1 представлены результаты расчетных значений энтропий разных марок быстрорежущих сталей и их сравнение с ЭДС относительно платины. Как видно, существует связь между энтропией БРС, как термодинамической характеристикой, и относительной (абсолютной) термо-ЭДС, которая в первом приближении отображается кривой гиперболического типа.

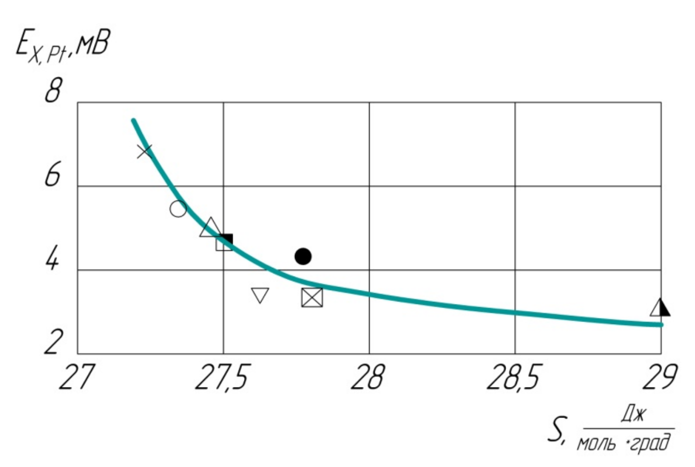


Рис. 1. Связь между энтропией и термо-ЭДС для быстрорежущих сталей разных марок (ГОСТ 19265–73): ▽ — Р6Ф2К8М5, ◭ — Р12Ф2К8М3, ○ — Р18,— Р6М4Ф4, × — Р6М5, ⊠ — Р6М5К5, ◪ — Р8М3Ф4, ● — Р9Ф5

Fig. 1. Relationship between entropy and thermo-EMF for high-speed steels of different types (GOST 19265-73): △ ▽ — Р6Ф2К8М5, ◭ — Р12Ф2К8М3, ○ — Р18, △ — Р6М4Ф4, × — Р6М5, ⊠ — Р6М5К5, ◪ — Р8М3Ф4, ● — Р9Ф5

Экспериментальная часть. Для установления связи между энтропией, как термоэлектрической характеристикой БРС, и их износостойкостью были проведены трибологические испытания цилиндрических образцов БРС диаметром 5 мм с помощью приспособления, установленного на станке модификации 1К625, позволяющего измерять красностойкость, температуру и силу трения при различных значениях удельного давления и скорости трения (рис. 2).

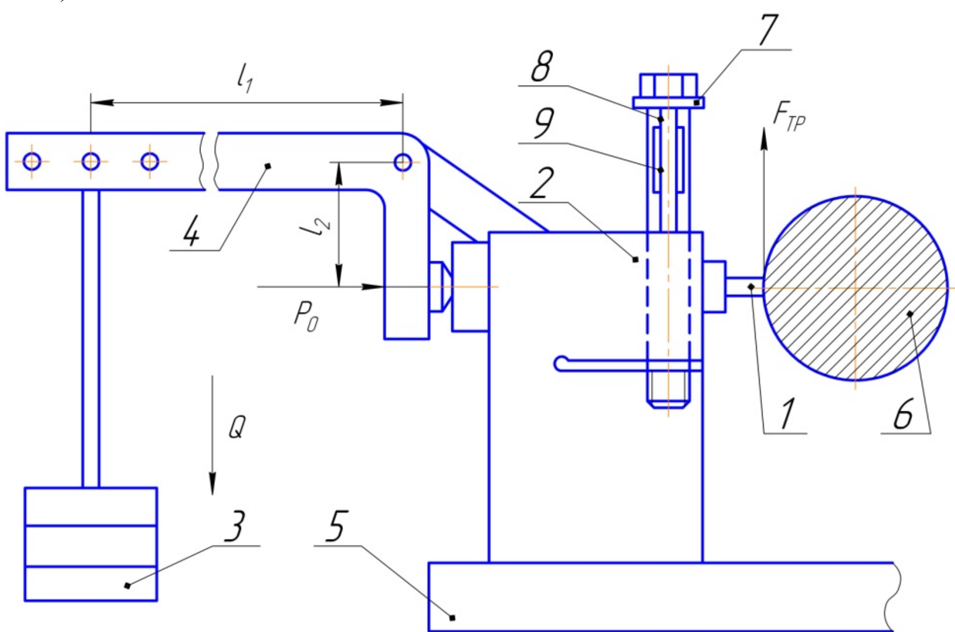


Рис. 2. Схема приспособления для трибологических испытаний

Fig. 2. Diagram of device for tribological testing

Образец 1 имеет возможность перемещаться в корпусе 2 приспособления под действием груза 3 и рычага 4. Корпус расположен на основании 5, жестко закрепленном на поперечном суппорте станка. В центре станка закреплен вал 6. В корпусе имеется прорезь, благодаря чему перемещения образца через стойку 7 и балку 8 регистрируются тензодатчиками сопротивления 9.

Время, за которое выбранный путь трения будет пройден при заданной частоте вращения вала 6, определяется из соотношения:

$$t_{TP} = \frac{10^3 \cdot L_{TP}}{\pi \cdot D \cdot n}$$

где L_{TP} — выбранный путь трения, м; D — диаметр вала, мм; n – частота вращения, об/мин.

При испытаниях принимали скорость трения 0,16–1,3 м/с и удельные давления 30–60 МПа. Путь трения равнялся 1000 м. Результаты исследований представлены на рисунке 3. Сравнительную износостойкость образцов определяли по методике из работы [9]. В результате испытаний на трение и износ наилучшими по всем показателям следует считать стали Р6М4Ф4, Р9Ф5 и Р6Ф2К8М5.

Этот вывод был подвергнут дальнейшей проверке при сверлении в стали 45 (НВ 197) отверстий диаметром 13 мм глубиной 40 мм на вертикально-сверлильном станке модификации 2А125 с подачей 0,28 мм/об и скоростью резания 0,36 м/с при обильном охлаждении 5% раствором эмульсола с расходом 5 л/мин.

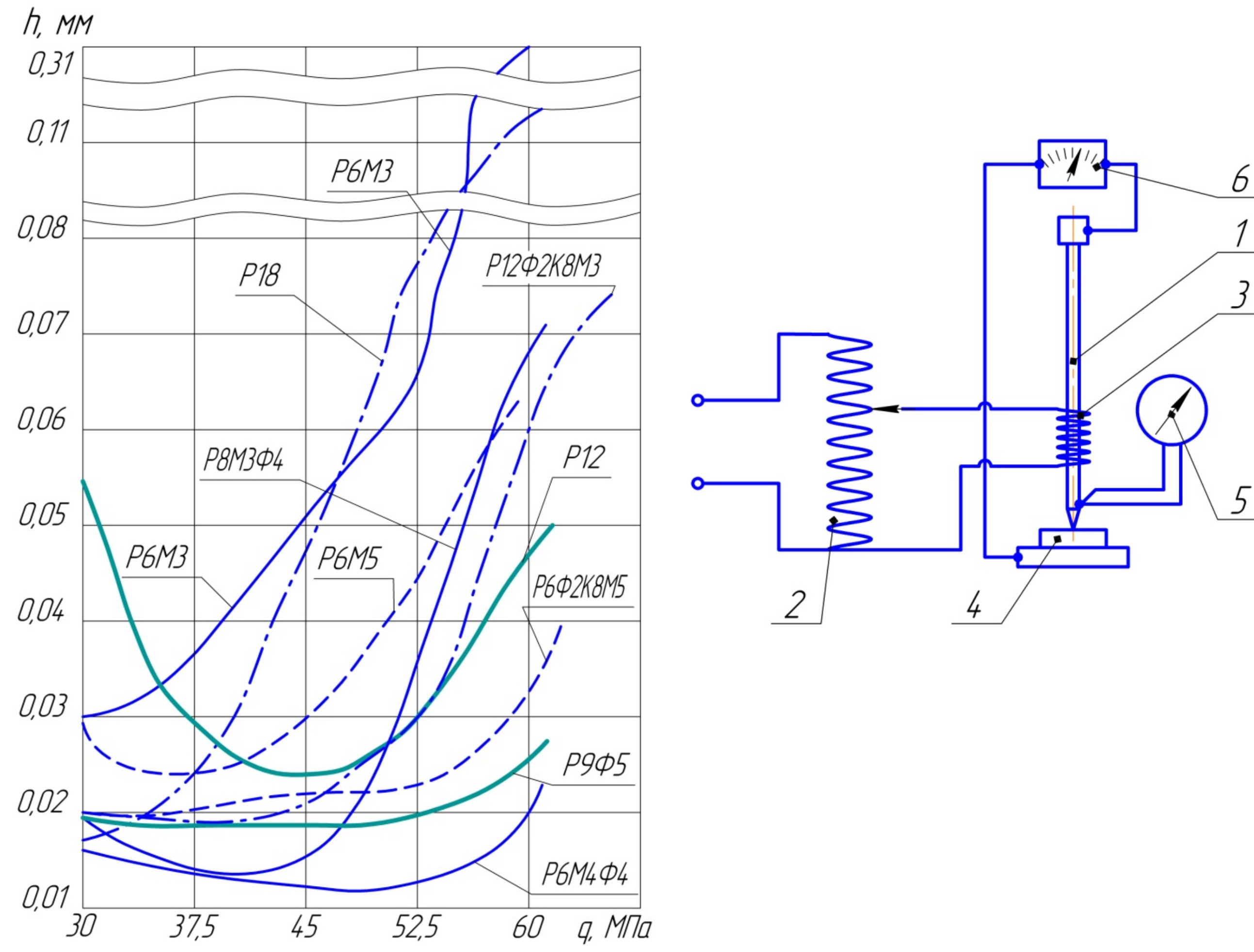


Рис. 3. Зависимость линейного износа h образцов от удельного давления при V=const=0,33 м/с

Fig. 3. Dependence of linear wear rate h of samples on specific pressure at V= const= 0.33 m / s

Рис. 4. Электрическая схема установки для измерения термо-ЭДС

Fig. 4. Electrical diagram of installation for measuring thermo-EMF

Всего испытано 225 свёрл — по 25 образцов, изготовленных из каждой марки стали. Износ свёрл измеряли после обработки 20 отверстий; стойкость Т оценивали числом отверстий, просверленных до переточки. Результаты стойкостных испытаний, обработанные с использованием элементов теории надёжности [10], представлены в таблице 1 (графы 4–6). Видно, что наилучшие режущие свойства показали свёрла из сталей Р12Ф2К8М3, Р6Ф2К8М5 и Р6М4Ф4.

Были произведены измерения термо-ЭДС образцов БРС при помощи приспособления, электрическая схема которого представлена на рисунке 4.

Вольфрамовый стержень 1 диаметром 1,6–2,0 мм, нагреваемый до необходимой температуры при помощи лабораторного трансформатора 2 и спирали 3, соприкасается с исследуемым образцом 4. Температура стержня определяется посредством термопары и милливольтметра 5. Величину возникающей при этом термо-ЭДС фиксируют вольтметром 6. В таблице 1 (столбец 1–2) и на рис. 5 приведены значения абсолютных термо-ЭДС БРС.

Связь термо-ЭДС с данными по интенсивности изнашивания и экспериментальными результатами стойкостных испытаний свёрл из быстрорежущих сталей разных марок наглядно представлена на рис. 6, из которого следует, что наиболее эффективны стали, имеющие минимальные значения термо-ЭДС.

Таблица 1
Table 1

Физические и эксплуатационные характеристики БРС

Physical and operational characteristics of HSS

Марки сталей	Абсолютная термо-ЭДС E, мкВ/^{0}C	Энтропия S^0, Дж/моль ^{0}C	Интенсивность изнашивания, $J*10^{-8}$	Стойкость свёрл, шт. отв.	
				средняя	Гарантийная (вероятность 0,9)
1	2	3	4	5	6
Р18	15,2	28,04	2,5	144	66
Р6М5	15,0	27,26	3,0	178	82
Р6М4Ф4	13,5	27,46	2,5	245	68
Р4М4Ф4	8,7	27,3	-	102	68
Р8М3Ф4	10,8	27,53	1,6	175	70
Р9Ф5	11,5	27,83	1,5	145	69
Р6Ф2К8М5	4,2	30,60	1,5	241	90
Р12Ф2К8М3	6,1	30,78	1,4	332	130

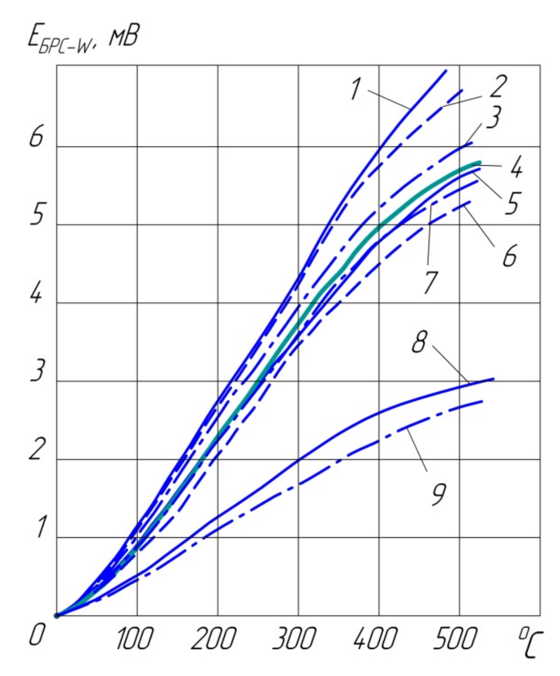


Рис. 5. Значения термо-ЭДС различных марок БРС относительно вольфрама. Кривые: 1 — Р6М5; 2 – Р6М4Ф4; 3 — Р18; 4 — Р6М3; 5 — Р12; 6 — Р9Ф5; 7 — Р8М3Ф4; 8 — Р12Ф2К8М3; 9 — Р6Ф2К8М3

Fig. 5. Values of thermo-EMF of different HSS types relative to tungsten. Curves: 1 - P6M5; 2 - P6M4F4; 3 - P18; 4 - P6M3; 5-P12; 6 - P9F5; 7 - P8M3F4; 8 - P12F2K8M3; 9 - P6F2K8M3

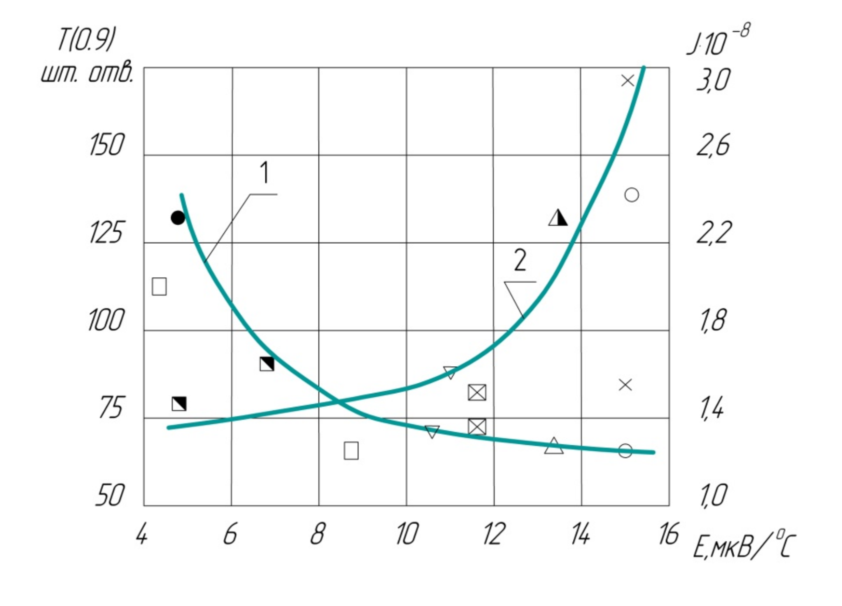


Рис.6. Взаимосвязь абсолютной термо-ЭДС и интенсивности изнашивания БРС при трении (кривая 2) и гарантийной стойкости сверл при резании (кривая 1) для разных марок быстрорежущих сталей. Кривые: ◪ — Р6Ф2К8М5, ● — Р12Ф2К8М3, ○ — Р18, □ — Р4М4Ф4, △ — Р6М4Ф4, × — Р6М5, ▲ — Р6М5К5, ▽ — Р8М3Ф4, ⊠ — Р9Ф5

Fig.6. Relationship between absolute thermo-EMF and HSS wear rate under friction (curve 2), and warranty of drills under cutting (curve 1) for different HSS types. Curves: ◪ — Р6Ф2К8М5, ● — Р12Ф2К8М3, ○ — Р18, □ — Р4М4Ф4, △ — Р6М4Ф4, × — Р6М5, ▲ — Р6М5К5, ▽ — Р8М3Ф4, ⊠— Р9Ф5

Выводы.

1. Установлена связь между износостойкостью быстрорежущих сталей и структурно-чувствительными характеристиками материалов на микроуровне — энтропией и абсолютной термо-ЭДС. Для снижения износа БРС при трении и резании необходимо применять марки БРС с максимальной энтропией и минимальной термо-ЭДС.

2. Так как расчёт энтропий материалов не вызывает затруднений, то этот показатель может быть использован для прогнозирования износостойкости вновь разрабатываемых марок БРС.

Библиографический список

1. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием: физические основы: уч. пособие /А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1996. — 242 с.

2. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект) / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 322 с.

3. Рыжкин, А. А. О связи между износостойкостью и физическими свойствами инструментальных материалов / А. А. Рыжкин, В. В. Илясов // Вестник машиностроения. — 2000. — №12. — С.32–40.

4. Morgner W. Untersuchung mikroskopischer Inhomogenitaten in Stahlen durch Kontaktthermokraftmessung / W. Morgner, B. Becker, H.-J. Spies // WZ der TH Otto von Goricke, Magdeburg. — 1970. — Heft 1, №14. — S.3–11.

5. Выбор оптимальных режимов изнашивания по трибоэлектрическим характеристикам зоны резания / А. А. Рыжкин [и др.] // Проблемы трибоэлектрохимии: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. — Новочеркасск, 2006. — С.207–210.

6. Ryshkin A. Uber die elektrischen Erscheinungen beim Spanen von Metallen/ A. Ryshkin // WZ der Karl-Marx-Stadt. — 1973. — Heft 4, №15. — S.711–725.

7. Карапетьянц, М. Х. Введение в теорию химических процессов / М.Х. Карапетьянц. — Москва : Высшая школа, 1975. — 330 с.

8. Оценка работоспособности высокоэнтропийных инструментальных режущих материалов / А. А. Рыжкин [и др.] // Трение и износ. — 2016. — №1. — С.60–69.

9. Износостойкость новых марок быстрорежущих сталей / А. А. Рыжкин [и др.] // Металлорежущие станки и прогрессивные методы обработки металлов резанием: сборник статей — Ростов-на-Дону : Изд. центр РИСХМ, 1972. — С. 82–87.

10. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments / D. C. Montgomery. — Eighth edition, John Wiley & Sons, 2013. — 757 p.

References

1. Ryzhkin, A.A. Obrabotka materialov rezaniem: fizicheskie osnovy. [Processing of materials by cutting: physical basics.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1996, 242 p. (in Russian).

2. Ryzhkin, A.A. Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh rezhushchikh materialov (triboelektricheskiy aspekt). [Synergetics of cutting-tool materials wear (triboelectric aspect)]. Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2004, 322 p. (in Russian).

3. Ryzhkin, A.A., Ilyasov, V.V. O svyazi mezhdu iznosostoykost'yu i fizicheskimi svoystvami instrumental'nykh materialov. [On the relationship between wear resistance and physical properties of tool materials.]Vestnik Mashinostroeniya, 2000, no. 12, pp. 32–40 (in Russian).

4. Morgner, W., Becker, B., Spies, H.-J. Untersuchung mikroskopischer Inhomogenitaten in Stahlen durch Kontaktthermokraftmessung. WZ der TH Otto von Goricke, Magdeburg, 1970, Heft 1, №14, S. 3–11.

5. Ryzhkin, A.A., et al. Vybor optimal'nykh rezhimov iznashivaniya po triboelektricheskim kharakteristikam zony rezaniya. [Selection of optimal wear modes due to triboelectric characteristics of the cutting zone.] Problemy triboelektrokhimii: sb. trudov Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Problems of triboelectrochemistry: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.] Novocherkassk, 2006, pp. 207–210 (in Russian).

6. Ryshkin, A. Uber die elektrischen Erscheinungen beim Spanen von Metallen. WZ der Karl-Marx-Stadt, 1973, Heft 4, №1, S.711–725.

7. Karapetyants, M.K. Vvedenie v teoriyu khimicheskikh protsessov. [Introduction to the theory of chemical processes.] Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 330 p. (in Russian).

8. Ryzhkin, A.A. et al. Otsenka rabotosposobnosti vysokoentropiynykh instrumental'nykh rezhushchikh materialov. [Determination of the efficiency of high-entropy cutting tool materials.] Journal of Friction and Wear, 2016, no. 1, pp. 60–69 (in Russian).

9. Ryzhkin, A.A. et al. Iznosostoykost' novykh marok bystrorezhushchikh staley. [Wear resistance of new types of high-speed steels.] Metallorezhushchie stanki i progressivnye metody obrabotki metallov rezaniem: sbornik statey. [Metal-

cutting machines and advanced methods of metal cutting: coll. of sci. papers.] Rostov-on-Don: RISKhM Publ. Centre, 1972, pp. 82–87 (in Russian).

10. Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments. Eighth edition, John Wiley & Sons, 2013, 757 p.

Поступила в редакцию 11.01.2017
Сдана в редакцию 11.01.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 11.01.2017
Submitted 11.01.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах.

Рыжкин Анатолий Андреевич,
заведующий кафедрой «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2483-8567
ryzhkin.anatolia@yandex.ru

Фоминов Евгений Валерьевич,
ведущий электроник кафедры «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0165-7536
fominoff83@mail.ru

Тороп Юрий Алексеевич,
ведущий инженер кафедры «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2722-8107
yuriy.torop87@mail.ru

Authors.

Ryzhkin, Anatoly A.

Head of the Tool Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2483-8567
ryzhkin.anatolia@yandex.ru

Fominov, Evgeny V.,
senior electronic engineer of the Tool Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0165-7536
fominoff83@mail.ru

Torop, Yury A.,
senior engineer of the Tool Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2722-8107
yuriy.torop87@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631.354:621.9.048.6 10.23947/1992-5980-2017-17-2-38-45

Экспериментальные исследования виброволновых процессов в технологии утилизации деталей зерноуборочного комбайна (на примере направляющих шкивов)*

А. П. Бабичев[1], В. Н. Веснин[2], А. А. Акулова[3] , А. Н. Михайлов[4] **
[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[4] Донецкий Национальный Технический Университет (ДНТУ), г. Донецк

Experimental studies on vibrowave processes in utilization technology of combine harvester parts (case study: guide pulleys)***

A. P. Babichev[1], V. N. Vesnin[2], A. A. Akulova[3], A. N. Mikhaylov[4] **
[1, 2, 3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[4] Donetsk National Technical University, Donetsk

Введение. Целями данной работы являются экспериментальные исследования виброволновых процессов в технологии утилизации деталей зерноуборочного комбайна (на примере направляющих шкивов) и определение наиболее эффективной абразивной среды.
Материалы и методы. Рассмотрены детали зерноуборочного комбайна — четыре натяжных ролика поликлинового ремня диаметром 150 мм с различной степенью масляных эксплуатационных загрязнений и остатков застаревшей краски и грунта. В качестве рабочих сред приняты: бой абразивных кругов; фарфоровые шары (d = 6–8 мм); абразивные гранулы ПТ 15×15; 4) стальные шары (d = 5–7 мм). При внешнем осмотре деталей отмечено, что все ролики имеют масляные эксплуатационные загрязнения и остатки старой краски. Загрязнены образцы примерно одинаково. Ролики взвешены. Выполнена обработка в вибрационной установке УВГ 4×10. Режим обработки: A = 2,5 мм; частота колебаний — 30 Гц; продолжительность обработки t = 30 мин. В качестве технологической жидкости (ТЖ) применен 2-процентный раствор кальцинированной соды. По окончании 30-минутной вибрационной моечно-очистной операции образцы были обмыты водой, высушены и взвешены. Произведен внешний осмотр роликов после обработки. Отмечено, что наиболее эффективно натяжные ролики очищены при обработке в среде, состоящей из боя абразивных кругов и гранул ПТ 15×15. Однако поверхность образцов очистились не полностью. Произведен следующий этап эксперимента — дефектация деталей и определение их соответствия ТУ. Отмечено, насколько обработанные образцы пригодны для дальнейшего использования.
Результаты исследования. По результатам измерений отмечено: при одинаковых условиях виброобработки направляющих роликов наиболее эффективно очищает поверхность бой абразивных кругов.
Обсуждение и заключение. После определения наиболее эффективного компонента очистки была проведена дефектация

Introduction. The work objectives are pilot studies of vibrowave processes in the utilization technology of combine harvester parts through the example of guide pulleys, and the determination of the most effective abrasive environment.
Materials and Methods. Combine harvester aggregates are considered – four idlers of the poly-V-belt with the diameter of 150 mm with various degrees of the oil consumption pollution, and old paint and soil remains. The following is accepted as an operating environment: broken abrasive disks; porcelain balls (d=6-8mm); abrasive PT grains of 15×15; steel balls (d=5-7mm). At the exterior check of the parts, it is noticed that all rollers have oil consumption pollution and old paint remains. The samples are contaminated approximately equally. The rollers are weighed. The treatment is performed in the vibration hydrocarbon gas unit 4×10. The processing mode is as follows: A = 2.5 mm; frequency of oscillations — 30 Hz; treatment time t = 30 min.). 2% solution of soda ash is used as a process liquid (PL). At the end of the 30-minute vibration washing and scrubbing operation, the samples were washed with water, dried and weighed. An external examination of the rollers after processing was performed. It was marked that the idler rollers were most effectively cleaned when processing in a medium consisting of the broken abrasive disks and 15×15 PT grains. However, the surface of the samples was not completely cleaned. The next stage of the experiment was performed — fault defection of the parts and determination of their conformity with the specifications. It is described how much the processed samples are suitable for the further use.
Research Results. According to the measurement results, under the identical conditions for the vibratory treatment of guide pulleys, it is most effective to clean the surface using broken abrasive disks.
Discussion and Conclusions. After specifying the most effective purification component, the defective parts are inspected

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: vibrotech@mail.ru; vesnin.1991@mail.ru; akulishnaalina@mail.ru
***The research is done within the frame of independent R&D.

деталей и определение соответствия их ТУ. Как показали результаты исследований, 3 из 4 деталей пригодны для вторичного использования в производстве.

and their TU compliance is determined. As the research results show, 3 out of 4 parts are suitable for recycling in the production.

Ключевые слова: утилизация, ролик, зерноуборочный комбайн, рабочая среда, абразивные гранулы, дефектация, компоненты, жизненный цикл, осмотр, взвешивание.

Keywords: utilization, roller, combine harvester, operating environment, abrasive grains, fault detection, components, life cycle, examination, weighing.

Введение. В мировом и отечественном машиностроении неуклонно растет объем изготавливаемых и используемых изделий. Они непрерывно совершенствуются, заменяя устаревшие или изношенные, количество которых также постоянно растет. Процессы их эффективного использования и утилизации требуют обстоятельных и всесторонних технологических исследований [1, 2, 3].

Известно, в частности, что по завершении жизненного цикла изделия до 70 % (а иногда до 90 %) его элементов (деталей, узлов) не вырабатывают свой ресурс и пригодны для дальнейшего применения [3]. Их рациональное использование решает ряд народнохозяйственных задач в части экономии материалов и трудозатрат, энергосбережения и улучшения экологии [4, 5, 6].

Основная часть. В предлагаемой статье рассмотрены результаты утилизации одного из агрегатов зерноуборочного комбайна на примере натяжных роликов поликлинового ремня диаметром 150 мм [1, 7, 8]. Данные образцы взяты с комбайна снятого с эксплуатации (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид роликов до начала обработки

Fig. 1. General view of rollers before processing

Экспериментальная часть. В качестве первого этапа произведен внешний осмотр деталей. Отмечено, что все ролики имеют масляные эксплуатационные загрязнения и остатки старой краски. Загрязнены образцы примерно одинаково [9]. Произведено взвешивание роликов. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Исходный вес роликов

Basic weight of rollers

Наименование изделия	Вес, кг
Ролик 1	1,457
Ролик 2	1,460
Ролик 3	1,458
Ролик 4	1,460

Цель исследований — определение наиболее эффективной абразивной среды. В качестве рабочей среды приняты:

1) бой абразивных кругов,
2) фарфоровые шары (d = 6–8 мм),
3) абразивные гранулы ПТ 15×15,
4) стальные шары (d = 5–7 мм) [10, 11].

В качестве оборудования использовалась вибрационная установка УВГ 4×10. Режим обработки: A = 2,5 мм; частота колебаний — 30 Гц; продолжительность обработки t = 30 мин. В качестве технологической жидкости (ТЖ) применен 2-процентный раствор кальцинированной соды [2].

По окончании 30-минутной вибрационной моечно-очистной операции образцы были обмыты водой, высушены и взвешены [1]. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты сравнения веса деталей после вибрационной моечно-очистной операции

Comparison results of parts weight after vibratory washing-cleaning operation

№ детали и вид рабочей среды	Исходный вес	Вес после очистки	Изменение
Ролик 1 (бой абразивных кругов)	1,457	1,446	0,011
Ролик 2 (фарфоровые шары)	1,460	1,450	0,010
Ролик 3 (гранулы ПТ15×15)	1,458	1,447	0,011
Ролик 4 (стальные шары)	1,460	1,451	0,009

Отмечено, что изменения в весе незначительны, так как размеры роликов небольшие и степень загрязнения невысока.

Произведен внешний осмотр роликов после обработки (рис. 2).

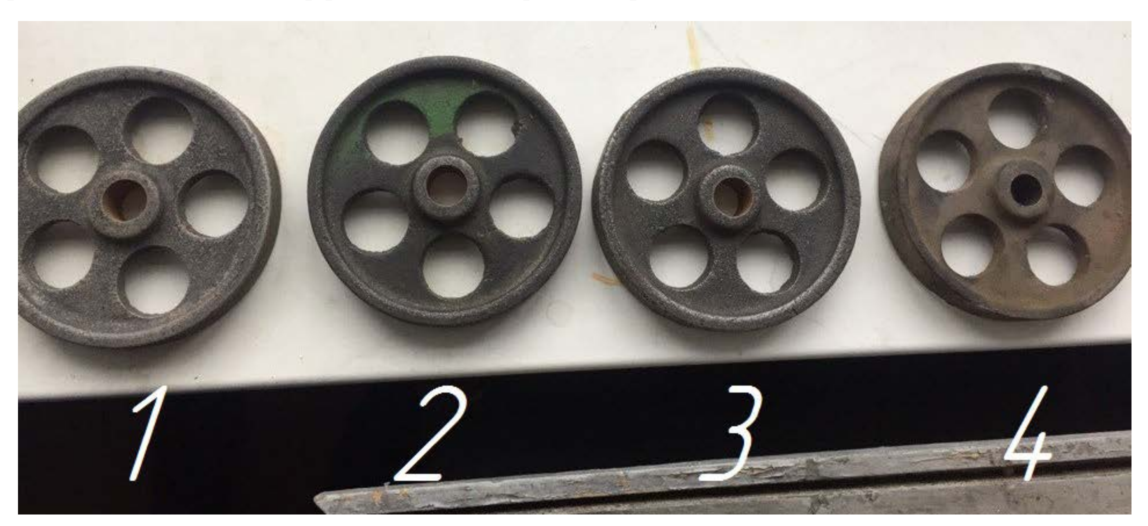


Рис. 2. Ролики после 30-минутной очистки в разных средах

Fig. 2. Rollers after 30-minute cleaning in various media

По результатам обработки отмечено, что наиболее эффективно натяжные ролики очищены при обработке в среде, состоящей из боя абразивных кругов и абразивных гранул ПТ 15×15. Однако поверхность образцов очищена не полностью [8].

Произведена дополнительная обработка в течение 30 минут. Условия и рабочие среды прежние. Результаты обработки представлены табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Результаты сравнения веса деталей после вибрационных моечно-очистных операций

Comparison results of parts weight after vibratory washing-cleaning operations

№ детали и вид рабочей среды	Вес после первой очистки, кг	Вес после второй очистки, кг	Изменение, кг
Ролик 1 (бой абразивных кругов)	1,446	1,440	0,006
Ролик 2 (фарфоровые шары)	1,450	1,442	0,008
Ролик 3 (гранулы ПТ 15×15)	1,447	1,441	0,006
Ролик 4 (стальные шары)	1,451	1,440	0,009

Данные об изменении веса деталей в зависимости от вида абразива графически представлены на рис. 3.

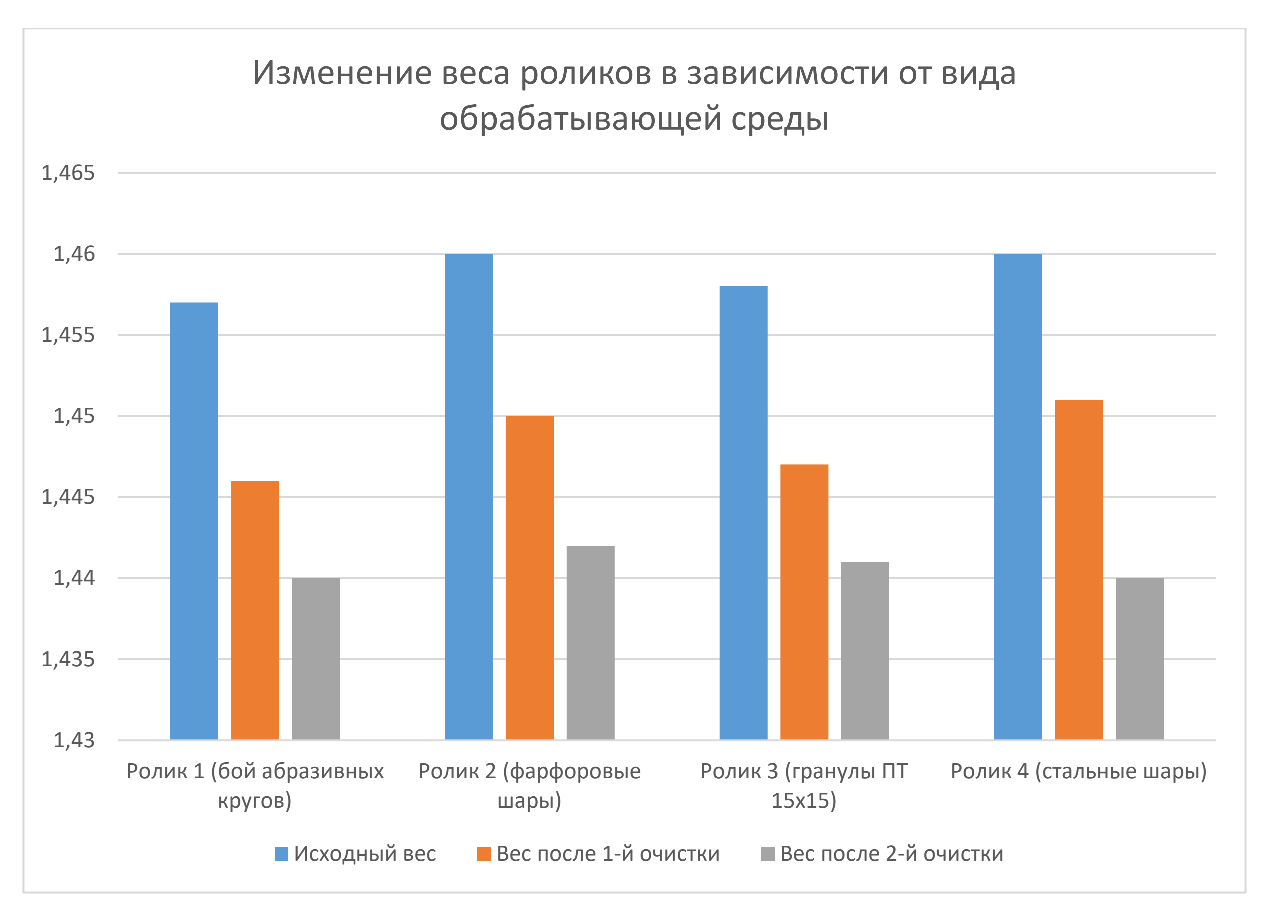
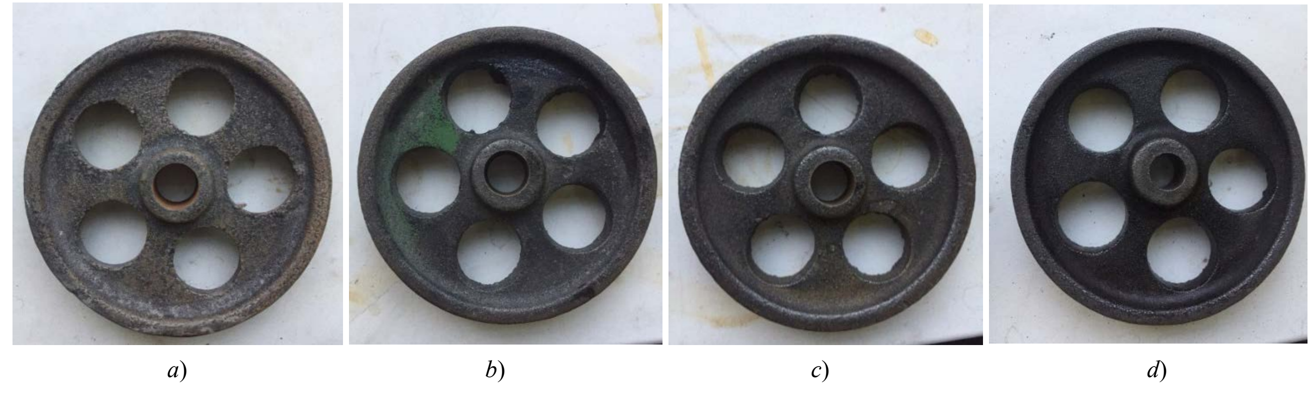


Рис. 3. Изменение веса образцов в зависимости от вида обрабатывающей среды

Fig. 3. Change in weight of samples depending on processing medium type

Изменение внешнего вида деталей после дополнительной обработки зафиксировано на рис. 4.



a) *b*) *c*) *d*)

Рис. 4. Внешний вид образцов после обработки в различных рабочих средах: бой абразивных кругов (*a*); фарфоровые шары (*b*); гранулы ПТ 15×15 (*c*); стальные шары (*d*)

Fig. 4. Appearance of samples after treatment in various operating environments: broken abrasive disks (*a*); porcelain balls (*b*); PT grains 15×15 (*c*); steel balls (*d*)

Результаты измерений показали, что при одинаковых условиях вибрационной моечно-очистной обработки направляющих роликов наиболее эффективен бой абразивных кругов.

На следующем этапе эксперимента проводилась дефектация деталей и определение соответствия их ТУ (рис. 5).

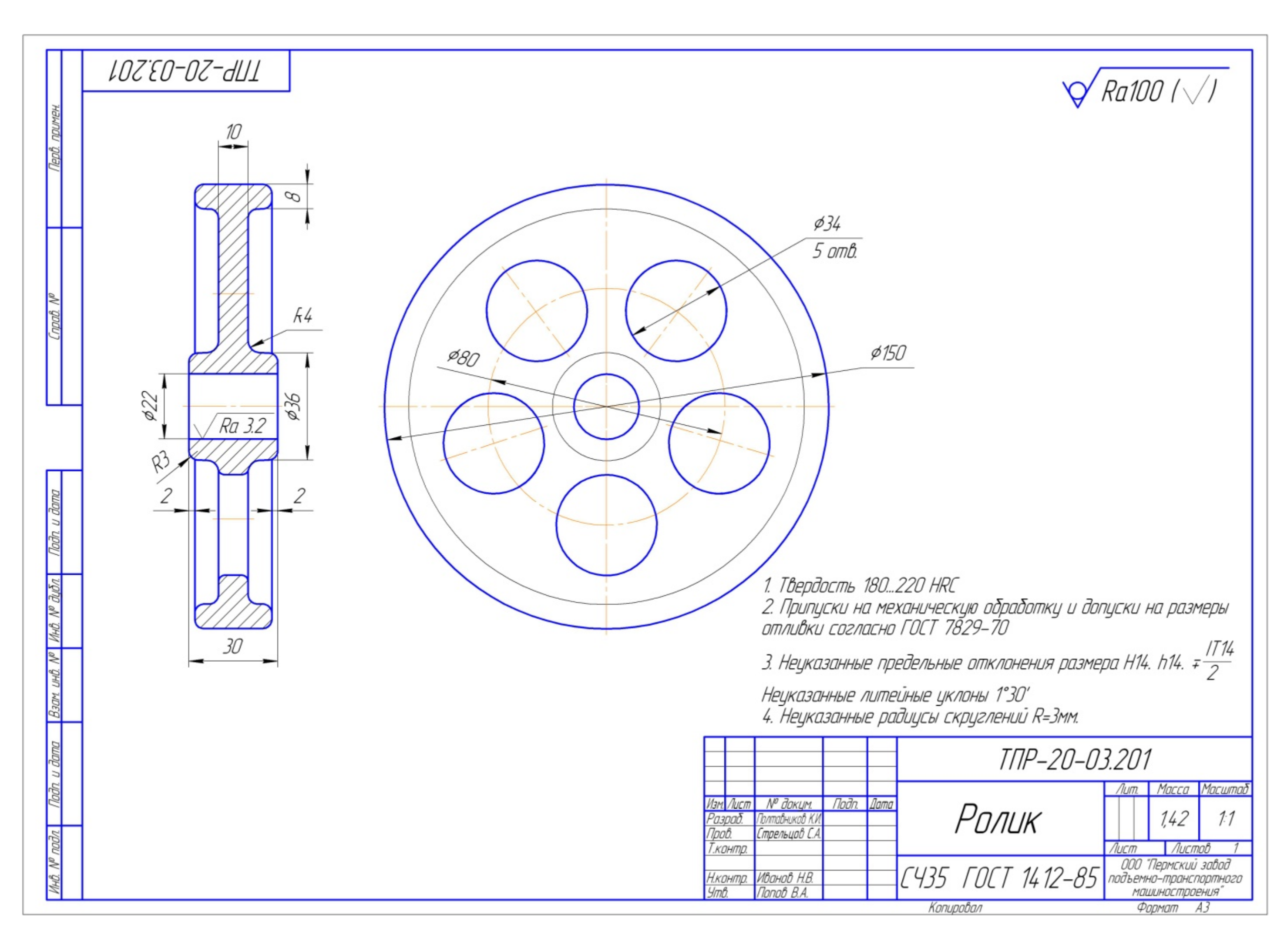


Рис. 5. Технические требования к параметрам роликов

Fig. 5. Technical requirements for parameters of rollers

Ролик 1 (*бой абразивных кругов*). Внешний диаметр — 150,1 мм (соответствует чертежу). Внутренний диаметр ступицы — 22,5 мм (соответствует чертежу). Ширина ролика — 26,2 мм (соответствует норме). Отверстие расположено по центру. Деформации ролика нет. Внешний вид поверхности удовлетворительный.

Образец годен для дальнейшего использования.

Ролик 2 (*фарфоровые шары*). Внешний диаметр — 151,7 мм (не соответствует чертежу). Внутренний диаметр ступицы — 22,2 мм (соответствует чертежу). Ширина ролика — 26,4 мм (соответствует чертежу). Отверстие расположено не по центру. Внешний вид поверхности неудовлетворительный.

Образец непригоден для использования.

Ролик 3 (*гранулы ПТ15×15*). Внешний диаметр — 150,14 мм (соответствует чертежу). Диаметр внутренний ступицы — 21,37 мм (соответствует чертежу) Ширина ролика — 27,31 мм (соответствует чертежу). Отверстие имеет небольшое отклонение от центра. Деформации ролика нет. Внешний вид поверхности удовлетворительный.

Образец пригоден для дальнейшего использования, но с доработкой. Отверстие можно расточить до требуемого размера и обеспечить его расположение по центру.

Ролик 4 (*стальные шары*). Внешний диаметр — 150,25 мм (соответствует чертежу). Внутренний диаметр ступицы — 18,40 мм (не соответствует чертежу). Ширина ролика — 26,19 мм (соответствует чертежу). Отверстие расположено по центру. Деформации ролика нет. Внешний вид поверхности удовлетворительный.

Образец пригоден для вторичного использования с доработкой. Отверстие можно расточить до нужного диаметра и обеспечить его расположение по центру.

Итоговые результаты вибрационной моечно-очистной обработки и дефектации деталей сведены в табл. 4.

Таблица 4
Table 4

Данные о пригодности обработанных деталей для дальнейшей эксплуатации

Data on suitability of processed parts for further use

№ детали и вид рабочей среды	Состояние		
	Пригодны	Не пригодны	Пригодны с доработкой
Ролик 1 (бой абразивных кругов)	+		
Ролик 2 (фарфоровые шары)		+	
Ролик 3 (ПТ 15×15)			+
Ролик 4 (стальные шары)			+

Выводы. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что при вибрационной моечно-очистной обработке натяжных роликов поликлинового ремня наиболее эффективной абразивной средой является бой абразивных кругов. Очистка в данной среде позволяет эксплуатировать утилизированную деталь. Детали, обработанные в абразивных средах ПТ 15×15 и в стальных шарах, могут эксплуатироваться при условии дополнительной обработки. Фарфоровые шары в качестве абразивной среды неэффективны, т. к. после соответствующей обработки утилизированные детали непригодны для эксплуатации. В целом, в результате исследования установлено, что 3 из 4 утилизированных деталей пригодны для вторичного использования в производстве.

Библиографический список

1. Бабичев, А. П. Экспериментальные исследования виброволновых процессов в технологии утилизации сборочных единиц / А. П. Бабичев, В. Н. Веснин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — № 1. — С. 47–54.

2. Бабичев, А. П. Комплексные экспериментальные исследования технологии утилизации сборочной единицы зерноуборочного комбайна (на примере червячного редуктора) / А. П. Бабичев, Д. Эссоло, Г.-К. Вейсса // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии : сб. тр. Междунар. симп. технологов-машиностроителей. — Ростов-на-Дону, 2016. — С. 334–340.

3. Технологические и организационно-экономические аспекты утилизации изделий сельхозмашиностроения [Электронный ресурс] / А. П. Бабичев [и др.] // Динамика технических систем «ДТС-2015» : сб. тр. XII междунар. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — Режим доступа: http://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-vibrovolnovyh-protsessov-v-tehnologii-utilizatsii-sborochnyh-edinits (дата обращения: 02.05.17).

4. Tamarkin, M. A. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by spd in flexible granular environment / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, V. P. Fedorov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2016. — Vol. 124, conference 1. — P. 012169.

5. Tamarkin, M. A. Increased efficiency of vibroabrasive machining in the presence of ultrasound / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, I. L. Vyalikov // Russian Engineering Research. — 2015. — Vol. 35, № 10. — P. 740–744.

6. Reducing abrasive wear in centrifugal-rotary machining / M. A. Tamarkin [et al.] // Russian Engineering Research. — 2014. — Vol. 34, № 1. — P. 60–64.

7. Применение колебаний (вибраций) в процессах разборки неподвижных разъемных соединений в условиях ремонта и утилизации изделий машиностроения / А. П. Бабичев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 1 (62). — С. 50–55.

8. Бабичев, А. П. Совершенствование и сравнительная оценка способов разборки прессовых соединений при ремонте и утилизации изделий машиностроения / А. П. Бабичев, Д. Эссола // Изв. Юго-Зап. гос. ун-та. — 2014. — № 1 (52). — С. 122–126.

9. Бабичев, А. П. Вибрационные технологии в условиях ремонта изделий машиностроения / А. П. Бабичев, Д. Эссола, Н. С. Коваль // Механика ударноволновых процессов : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2012. — С. 204–211.

10. Бабичев, А. П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, Л. К. Гиллеспи. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2010. — С. 287.

11. Бабичев, А. П. Основы вибрационных технологий / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1999. — С. 624.

References

1. Babichev, A.P., Vesnin, V.N. Eksperimental'nye issledovaniya vibrovolnovykh protsessov v tekhnologii utilizatsii sborochnykh edinits. [Experimental research of vibrowave processes in recycling technology of assembly units.] Vestnik of DSTU, 2017, no. 1, pp. 47–54 (in Russian).

2. Babichev, A.P., Essola, D., Weissa, G.-K. Kompleksnye eksperimental'nye issledovaniya tekhnologii utilizatsii sborochnoy edinitsy zernouborochnogo kombayna (na primere chervyachnogo reduktora). [Complex experimental studies on utilization technology of assembly component of combine harvester (case study: worm gearbox).] Perspektivnye napravleniya razvitiya finishnykh metodov obrabotki detaley; vibrovolnovye tekhnologii: sb. tr. Mezhdunar. simp. tekhnologov-mashinostroiteley. [Prospective lines of development of finish machining methods; vibrowave technologies: Proc. Int. Symp. of Production and Mechanic Engineers.] Rostov-on-Don, 2016, pp. 334–340 (in Russian).

3. Babichev, A.P., et al. Tekhnologicheskie i organizatsionno-ekonomicheskie aspekty utilizatsii izdeliy sel'khoz-mashinostroeniya. [Engineering and business aspects of utilization of agricultural machinery products.] Dinamika tekhnicheskikh sistem «DTS-2015»: sb. tr. KhII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Dynamics of engineering systems of "DES-2015": Proc. XII Int. Sci.-Tech. Conf.] Rostov-on-Don, 2015. Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-vibrovolnovyh-protsessov-v-tehnologii-utilizatsii-sborochnyh-edinits (accessed: 02.05.17) (in Russian).

4. Tamarkin, M.A, Tishchenko, E.E., Fedorov, V.P. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 124, conference 1, p. 012169.

5. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Vyalikov, I.L. Increased efficiency of vibroabrasive machining in the presence of ultrasound. Russian Engineering Research, 2015, vol. 35, no. 10, pp. 740-744.

6. Tamarkin, M.A., et al. Reducing abrasive wear in centrifugal-rotary machining. Russian Engineering Research, 2014, vol. 34, no. 1, pp. 60–64.

7. Babichev, A.P., et al. Primenenie kolebaniy (vibratsiy) v protsessakh razborki nepodvizhnykh razdel'nykh soedineniy v usloviyakh remonta i utilizatsii izdeliy mashinostroeniya. [Application of vibrowave impact (vibrations) in disassembling fixed demountable joints under restoration and reclamation of engineering products.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 1 (62), iss. 1, pp. 50–55 (in Russian).

8. Babichev, A.P., Essola, D. Sovershenstvovanie i sravnitel'naya otsenka sposobov razborki pressovykh soedineniy pri remonte i utilizatsii izdeliy mashinostroeniya. [Modernization and comparative estimation of methods of disassembling pressed joints (connections) in the process of repairing or during utilization(recycling) of machine building engineering products.] Proceedings of Southwest State University, 2014, no. 1 (52), pp. 122–126 (in Russian).

9. Babichev, A.P., Essola, D., Koval, N.S. Vibratsionnye tekhnologii v usloviyakh remonta izdeliy mashinostroeniya. [Vibration technologies under engineering product recondition.] Mekhanika udarno-volnovykh protsessov: sb. trudov mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Mechanics of shock-wave processes: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.] Rostov-on-Don, 2012, pp. 204–211 (in Russian).

10. Babichev, A.P., Motrenko, P.D., Gillespie, L.K. Primenenie vibratsionnykh tekhnologiy na operatsiyakh otdelochno-zachistnoy obrabotki detaley. [Application of vibration technologies for finishing and clearing part operations.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2010, 287 p. (in Russian).

11. Babichev, A.P., Babichev, I.A. Osnovy vibratsionnoy tekhnologii. [Fundamentals of vibration technology.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 1999, 621 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 02.03.2017
Сдана в редакцию 02.03.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 02.03.2017
Submitted 02.03.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Бабичев Анатолий Прокофьевич,
профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1693-4831
vibrotech@mail.ru

Authors:

Babichev, Anatoly P.,
professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1693-4831
vibrotech@mail.ru

Веснин Владимир Николаевич,
аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2061-204X
vesnin.1991@mail.ru

Vesnin, Vladimir N.,
postgraduate student of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2061-204X
vesnin.1991@mail.ru

Акулова Алина Аркадьевна,
магистрантка кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-4636-9976
akulishnaalina@mail.ru

Akulova, Alina A.,
undergraduate of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-4636-9976
akulishnaalina@mail.ru

Михайлов Александр Николаевич,
заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета (Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Артема, 58), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4944-5954
mihailow.mih-aleksander@yandex.ru

Mikhaylov, Alexander N.,
Head of the Engineering Technology Department, Donetsk National Technical University (Donetsk People's Republic, Donetsk, Artem St., 58), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4944-5954
mihailow.mih-aleksander@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 678.549 10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55

The safest point method as an efficient tool for reliability-based design optimization applied to free vibrated composite structures*

G. Kharmanda**
Lund University, Lund, Sweden

Точечный метод как самый безопасный и эффективный инструмент для оптимизации на основе надежности применительно к свободным вибрированным композитным структурам***

Г. Харманда**
Лундский университет, г. Лунд, Швеция

Introduction. Reliability-Based Design Optimization (RBDO) model reduces the structural weight in uncritical regions; it provides not only an improved design but also a higher level of confidence in the design.
Materials and Methods. The classical RBDO approach can be carried out in two separate spaces: the physical space and the normalized space. Since lots of repeated researches are needed in the above two spaces, the computational time for such an optimization is a big problem. Fortunately, an efficient method called the Hybrid Method (HM) has been elaborated by which the optimization process is carried out in a Hybrid Design Space (HDS). When designing free vibrated structures, the HM can be used with a big implementation complexity, and that leads to high computing time. An efficient method called Safest Point (SP) method is developed to overcome this drawback.
Research Results. A numerical application on the composite aircraft wing under free vibrations shows the efficiency of the proposed method relative to the HM. The SP method can reduce efficiently the computing time relative to the HM.
Discussion and Conclusions. The simplified implementation framework of the SP strategy consists of decoupling the RBDO problem into a number of simple problems. That provides designers with efficient solutions that should be economically justified for a required reliability level for dynamic cases (modal studies).

Введение. Модель на основе оптимизации надежности (RBDO) снижает структурный вес в некритических регионах, обеспечивает не только улучшенный дизайн, но и более высокий уровень уверенности в конструкции.
Материалы и методы. Классический подход RBDO может быть выполнен в двух отдельных пространствах: физическом и нормализованном. Так как в этих двух пространствах требуется очень много повторных исследований, решающее время для такой оптимизации - большая проблема. К счастью, был разработан эффективный метод, называемый гибридным методом (HM), посредством которого процесс оптимизации завершается в гибридном пространстве проектирования (HDS). При проектировании свободных вибрирующих структур HM может использоваться с большой сложностью реализации и приводит к большому времени вычислений. Для преодоления этого недостатка разработан эффективный метод под названием Safest Point (SP).
Результаты исследования. Численное приложение на крыле самолета при свободных колебаниях показывает эффективность предложенного метода относительно HM. Метод SP может эффективно сократить время вычислений относительно HM.
Обсуждение и заключения. Упрощенная структура реализации стратегии SP состоит в разделении проблемы RBDO на ряд простых проблемах. Это обеспечивает конструкторам эффективные решения, которые должны быть экономически оправдывающими необходимый уровень надежности для динамических случаев (модальные исследования).

Keywords: Reliability-Based Design Optimization, structural reliability, safety factors.

Ключевые слова: оптимизация на основе надежности, структурная надежность, факторы безопасности.

Introduction

The objective of the RBDO model is to design structures which should be both economic and reliable where the solution reduces the structural weight in uncritical regions. It does not only provide an improved design but also a higher level of confidence in the design. The classical approach can be carried out in two separate spaces: the physical space and the normalized space. Since very many repeated researches are needed in the above two spaces, the computational time for such an opti-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: ghias.kharmanda@bme.lth.se
*** The research is done within the frame of independent R&D.

mization is a big problem [1,2]. The major difficulty lies in the evaluation of the probabilistic constraints, which is prohibitively expensive and even diverges with many applications. However, an efficient method called the Hybrid Method (HM) has been elaborated [3] where the optimization process is carried out in a Hybrid Design Space (HDS). This method has been shown to verify the optimality conditions relative to the classical RBDO method [3]. The advantage of the hybrid method allows us to satisfy a required reliability level for different cases (static, dynamic, …), but the vector of variables here contains both deterministic and random variables. Next, an OSF (Optimum Safety Factor) methodology has been proposed to simplify the optimization problem (reduction of number of variables) and aims to find at least a local optimum solution because it is based on the optimality conditions [4,5,6]. However, the OSF method cannot be used in some dynamic cases of free vibrated structures. So there is a strong motivation to develop a new technique that can overcome both drawbacks. In this paper, an efficient method, called Safest Point (SP) method is developed to give the reliability-based optimum solutions. A numerical application on a free vibrated composite aircraft wing is presented to show the efficiency of the SP method relative to the HM.

Reliability Analysis

Structural reliability analysis is a tool that assists the design engineer to take into account all possible uncertainties during the design and construction phases and the lifetime of a structure in order to estimate the probabilities of failure. The evaluation of the probability of failure is carried out using numerical integrals. However, Hasofer and Lind [7] proposed to evaluate a reliability index instead of the numerical integral calculation. The reliability index can be found by solving the following constrained optimization:

$$\beta = \min\left(\mathrm{u}^T \mathrm{u} = \min \sqrt{\sum_i^n u_i^2} \right) \quad \text{s.t.} \quad H(\mathrm{u}) \le 0 \tag{1}$$

where $H(\mathrm{u})$ is the limit state function in the normalized space (Figure 1). For more details about reliability index and probability of failure, the interested reader can see [8].

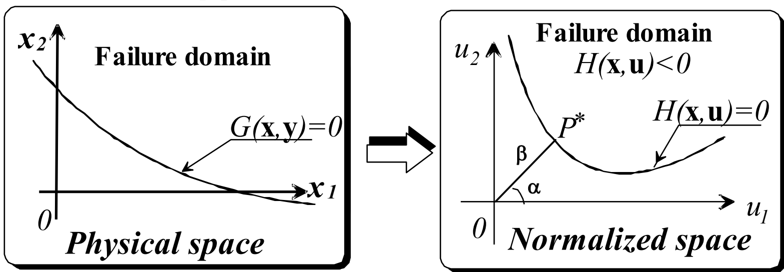


Fig. 1: The transformation between the physical space and normalized one

Рис. 1: Преобразование между физическим и нормированным пространством

Deterministic Design Optimization

In Deterministic Design Optimization (DDO), the system safety may be taken into account by assigning safety factors to certain structural parameters. Using these safety factors, the optimization problem which is carried out in the physical space (Fig. 1a), consists in minimizing an objective function (cost, volume of material,…) subject to geometrical, physical or functional constraints in the form

$$\min : \; f(\mathrm{x}) \quad \text{s.t.} \quad g_k(\mathrm{x}) \le 0 \;, \quad k = 1,...,K \tag{2}$$

where **x** designates the vector of deterministic design variables. Over the last 20 years there has been an increasing trend in analyzing structures using probabilistic information on loads, geometry, material properties, and boundary conditions. Using Deterministic Design Optimization (DDO), we can distinguish between two cases:

Case 1: High reliability level: when choosing high values of safety factors for certain parameters, the structural cost (or weight) will be significantly increased because the reliability level becomes much higher than the required level for the structure. So, the design is safe but very expensive.

Case 2: Low reliability level: when choosing small values of safety factors or bad distribution of these factors, the structural reliability level may be too low to be appropriate. For example, Grandhi and Wang [9] found that the resulting reliability index of the optimum deterministic design of a gas turbine blade is $\beta = 0.0053$ under some uncertainties. This result indicated that the reliability at the deterministic optimum is quite low and needs to be improved by reliability-based design optimization.

Reliability-Based Design Optimization

Classical Method (CM)

Traditionally, for the reliability-based optimization procedure we use two spaces: the physical space and the normalized space (Figure 1). Therefore, the reliability- based optimization is performed by nesting the two following problems:

1 *Optimization problem:*

$$\min \quad : f(\mathrm{x}) \;\; \text{s.t.} : g_k(\mathrm{x}) \le 0 \text{ and } \beta(\mathrm{x},\mathrm{u}) \ge \beta_t \tag{3}$$

where $f(\mathbf{x})$ is the objective function, $g_k(\mathrm{x}) \le 0$ are the associated constraints, β(x,u) is the reliability index of the structure, and β_t is the target reliability.

2 *Reliability analysis:*

The reliability index β(x,u) is determined by solving the minimization problem:

$$\beta = \min d(\mathrm{u}) = \sqrt{\sum_1^m u_j^2} \;\; \text{s.t.} : H(\mathrm{x},\mathrm{u}) \le 0 \tag{4}$$

where d(u) is the distance in the normalized random space and H(x,u) is the performance function (or limit state function) in the normalized space. Since a very large number of repeated searches are needed in the above two spaces, the computational time for such an optimization is a big problem. To reduce the effects of this difficulty, a hybrid method (HM) based on simultaneous solution of the reliability and the optimization problem has been elaborated [3].

Hybrid Method (HM)

The hybrid approach consists in minimizing a multiplicative form of the objective function $F(\mathbf{x},\mathbf{y})$ subject to a limit state and to deterministic as well as to reliability constraints, as:

$$\begin{aligned} &\min : F(\mathrm{x},\mathrm{y}) = f(\mathrm{x}).d_\beta(\mathrm{x},\mathrm{y}) \\ &\text{s.t.} \quad : G(\mathrm{x},\mathrm{y}) \le 0 \\ &\qquad : g_k(\mathrm{x}) \le 0 \\ &\text{and} : d_\beta(\mathrm{x},\mathrm{y}) \ge \beta_t \end{aligned} \tag{5}$$

Here, $d_\beta(\mathbf{x},\mathbf{y})$ is the distance in the hybrid space between the optimum and the design point, $d_\beta(\mathrm{x},\mathrm{y}) = d(\mathrm{u})$. The minimization of the function $F(\mathbf{x},\mathbf{y})$ is carried out in the Hybrid Design Space (HDS) of deterministic variables **x** and random variables **y**. An example of this HDS is given in figure 2, containing design and random variables, where the reliability levels d_β can be represented by ellipses in case of normal distribution, the objective function levels are given by solid curves and the limit state function is represented by dashed level lines except for $G(\mathbf{x},\mathbf{y})=0$. We can see two important points: the optimal solution P_x^* and the reliability solution P_y^* (i.e. the design point found on the curves $G(\mathrm{x},\mathrm{y})=0$ and $d_\beta = \beta_t$).

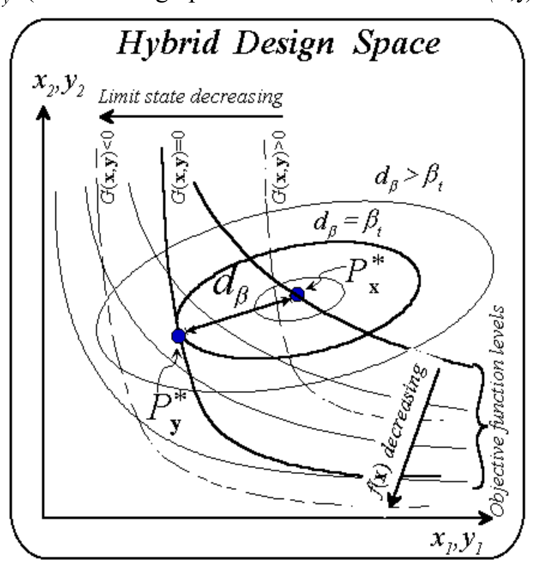


Fig. 2: Hybrid Design Space for normal distribution

Рис. 2: Гибридный дизайн пространства для нормального распределения

The hybrid approach leads to a high computing time especially when considering the dynamic cases. So we develop an efficient technique called Safest Point method (SP).

Safest Point Method (SP)

Let consider a given interval $[f_a,f_b]$. For the first shape mode, to get the reliability-based optimum solution for a given interval, we consider the equality of the reliability indices ($\beta_a = \beta_b$) with

$$\beta_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(u_i^a\right)^2} \;\; \text{and} \;\; \beta_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(u_i^b\right)^2} \quad i = 1,\dots,n \tag{6}$$

Here, we distinguish between two cases.

Case 1: Non-symmetric: $u_i^a \neq -\ u_i^b$ or $\left|u_i^a\right| \neq \left|u_i^b\right|$

The reliability-based optimum structure under free vibrations for a given interval of eign-frequency is found at the safest position of this interval where the safest point has the same reliability index relative to both sides of the interval (Figure 3). A simple method has been proposed here to meet the safest point requirements relative to a given frequency interval. The basic principle is to decompose the RBDO problem into three simple optimization problems.

Problem 1:

- The first problem consists of minimizing the objective function of the first structure subject to the frequency f_a constraint as follows

$$\min \quad : \ f^a\left(\mathrm{y}_a\right) \qquad \text{s.t.} : \mathit{freq}^a\left(\mathrm{y}_a\right) - f_a \leq 0 \tag{7}$$

Problem 2:

- The second problem consists in minimizing the objective function of the second structure subject to the frequency f_b constraint as follows

$$\min \quad : \ f^b\left(\mathrm{y}_b\right) \qquad \text{s.t.} : \mathit{freq}^b\left(\mathrm{y}_b\right) - f_b \leq 0 \tag{8}$$

Problem 3:

- The third is to minimize the objective function of the third model subject to the equality reliability constraints and the boundary frequency interval as follows:

$$\begin{aligned} &\min : \ f\left(\mathrm{x}\right) \\ &\text{s.t.} \ : \ \beta_a - \beta_b = 0 \\ &\text{and} \ : f_a < \mathit{freq}\left(\mathrm{x}\right) < f_b \end{aligned} \tag{9}$$

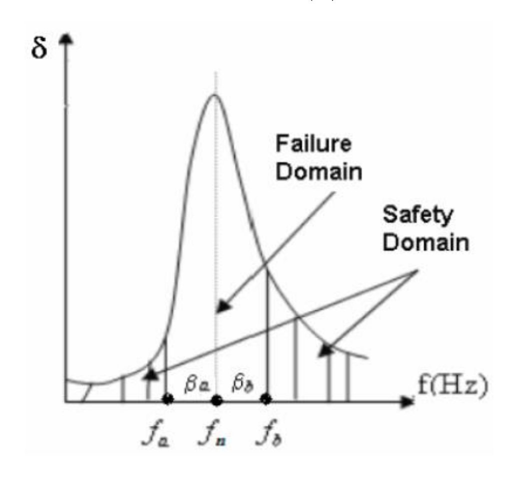


Fig. 3: The safest point at frequency fn

Рис. 3: Самая безопасная точка на частоте fn

Case 2: Symmetric: $u_i^a = -\ u_i^b$ or $\left|u_i^a\right| = \left|u_i^b\right|$

Problem 1:

- The first problem consists in minimizing the objective function of the first structure subject to the frequency f_a constraint as follows

$$\min \quad : \ f^a\left(\mathrm{y}_a\right) \qquad \text{s.t.} : \mathit{freq}^a\left(\mathrm{y}_a\right) - f_a \leq 0 \tag{10}$$

Problem 2:

- The second problem consists in minimizing the objective function of the second structure subject to the frequency f_b constraint as follows

$$\min \quad : \ f^b\left(\mathrm{y}_b\right) \quad \text{s.t.} : \mathit{freq}^b\left(\mathrm{y}_b\right) - f_b \leq 0 \tag{11}$$

To verify the equality (16), we propose the equality of each term. So we have:

$$u_i^a = - u_i^b \quad , \ i = 1, \dots, n \tag{12}$$

According to the normal distribution law, the normalized variable u_i is given by (12), we get:

$$\frac{y_i^a - m_i}{\sigma_i} = -\frac{y_i^b - m_i}{\sigma_i} \quad , \text{ or } \quad \frac{y_i^a - x_i}{\sigma_i} = -\frac{y_i^b - x_i}{\sigma_i} \quad , \quad i = 1, \dots, n \tag{13}$$

To obtain equality between the reliability indices (see equation 16), the mean value of variable corresponds to the structure at f_n. So the mean values of safest solution are located in the middle of the variable interval [y_i^a, y_i^b] as follows:

$$m_i = x_i = \frac{y_i^a + y_i^b}{2} \quad , \quad i = 1, \dots, n \tag{14}$$

In the next section, we demonstrate the efficiency of the proposed method on a numerical application of a composite aircraft wing under free vibrations for both cases (equality and inequality).

Numerical application on composite aircraft wing

The wing is uniform along its length with cross sectional area as illustrated in Figure 8a. It is firmly attached to the body of the airplane at one end. The chord of the airfoil has dimensions and orientation as shown in Figure 5. The wing is made of two different low density polyethylenes with the following properties:

Table 1

Таблица 1

Input parameters

Входные параметры

Parameters	Mat 1	Mat 2
Young's modulus (psi)	18.000	38.000
Poisson's ratio	0.3	0.3
Density (1bf-sec^2/in^4)	8.3E-5	8.3E-5
Effective thickness (m)	0.025	0.025

Assume the side of the wing connected to the plane is completely fixed in all degrees of freedom. The wing is solid and material properties are constant and isotropic.

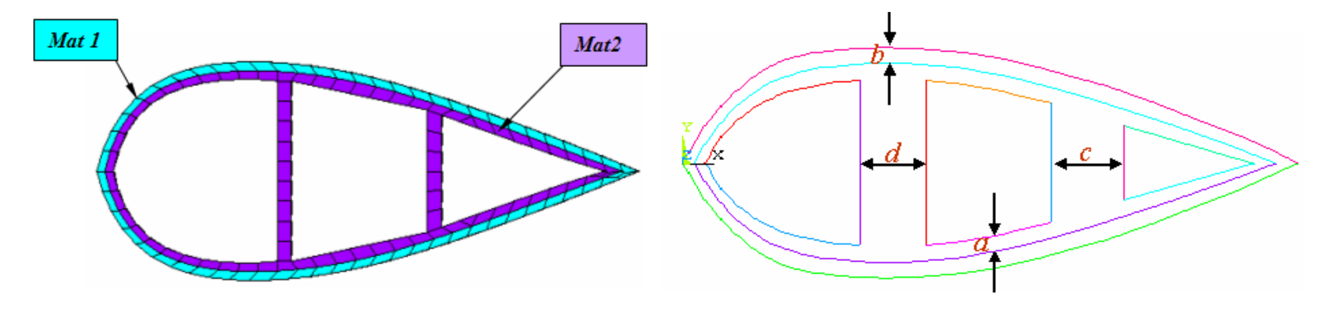


Fig. 4: Aircraft wing section and materials

Рис. 4: Сечение крыла самолета и материалы

The objective is to find the Eigen-frequency for a given interval [16,18] Hz, that is located on the safest position of this interval. So the first structure corresponds to the first frequency value of the given interval f_a=16 Hz, and the third structure corresponds to the last frequency value of the given interval f_b=18 Hz. However, the second structure corresponds to the unknown frequency value f_n=? Hz, which must verify the equality of reliability indices: $\beta_a = \beta_b$ (see Figure 5).

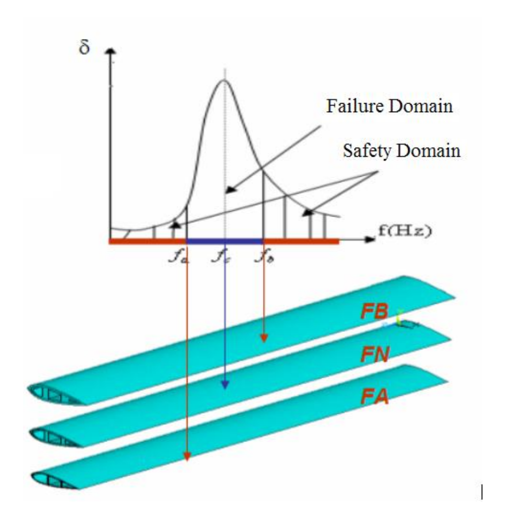
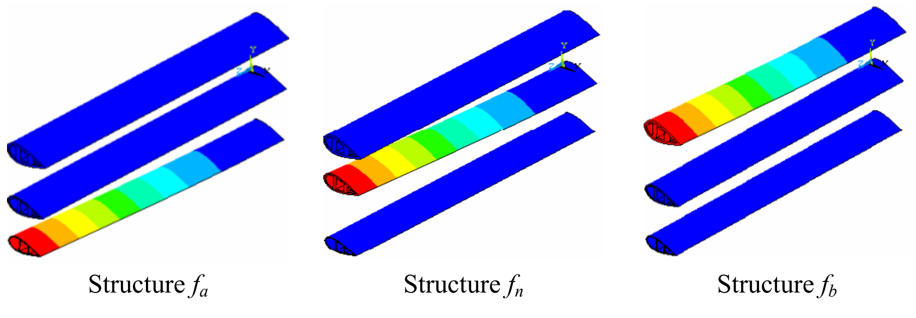


Fig. 5: Aircraft wing optimization models

Рис. 5: Модели оптимизации крыла самолета

Figure 6 shows the first shape mode of each structure, where the maximum values of displacements are located on the free wing side and the minimum values (zeros) of displacement is located at the fixed side.



Structure f_a Structure f_n Structure f_b

Fig. 6: Shape modes

Рис. 6: Режимы формы

Here, we can deal with two reliability-based design optimization methods: hybrid and safest point methods. The hybrid method (HM) simultaneously optimizes the three structures but the safest point method consists in optimizing three simple problems. So we distinguish two cases: $u_i^a \neq - u_i^b$ and $u_i^a = - u_i^b$: as follows:

Case 1: Non-symmetric: $u_i^a \neq - u_i^b$ or $\left|u_i^a\right| \neq \left|u_i^b\right|$

1- HM procedure: We minimize the multiplicative form of the objective function subject to the different frequencies constraint and the reliability one as follows:

$$\begin{aligned} &\min \ : Vol_n\left(m_A,\ldots,m_D\right).d_{\beta_a}(A_a,\ldots,D_a,m_A,\ldots,m_D).d_{\beta_b}(A_b,\ldots,D_b,m_A,\ldots,m_D) \\ &\text{s.t.} \ \ : \beta_a\left(A_a,\ldots,D_a,m_A,\ldots,m_D\right)-\beta_b\left(A_b,\ldots,D_b,m_A,\ldots,m_D\right)=0 \\ &\text{and} \ :f_a < freq^n(m_A,m_B,m_C,m_D) < f_b \end{aligned} \quad (15)$$

2- SP procedure: We have three simple optimization problems:

- The *first* is to minimize the objective function of the first model subject to the frequency f_a constraint as follows:

$$\min \ : Vol_a\left(A_a,B_a,C_a,D_a\right) \ \text{s.t.} \ : freq^a(A_a,B_a,C_a,D_a) - f_a \leq 0 \quad (16)$$

- The *second* is to minimize the objective function of the second model subject to the frequency f_b constraint as follows:

$$\min \ : Vol_b\left(A_b,B_b,C_b,D_b\right) \ \text{s.t.} \ : freq^b(A_b,B_b,C_b,D_b) - f_b \leq 0 \quad (17)$$

- The *third* is to minimize the objective function of the third model subject to the equality reliability constraints and the boundary frequency interval as follows:

$$\begin{aligned} &\min \ : Vol_n\left(m_A,m_B,m_C,m_D\right) \\ &\text{s.t.} \ \ : \beta_a\left(A_a,\ldots,D_a,m_A,\ldots,m_D\right)-\beta_b\left(A_b,\ldots,D_b,m_A,\ldots,m_D\right)=0 \\ &\text{and} \ :f_a < freq^n(m_A,m_B,m_C,m_D) < f_b \end{aligned} \quad (18)$$

Table 2

Таблица 2

Results of the aircraft wing for the first case

Результаты применения методов для первого случая

	Variables	Initial design	Optimum design with SP	Optimum design with HM
FN	A	0.04	0.03948	0.03960
	B	0.05	0.04138	0.04758
	C	1.00	0.98826	0.98815
	D	0.425	0.47733	0.41764
FA	A1	0.02	0.02730	0.02944
	B1	0.02	0.02004	0.02531
	C1	0.9	0.90021	0.91867
	D1	0.5	0.49983	0.48806
FB	A2	0.06	0.05346	0.05688
	B2	0.08	0.06088	0.06386
	C2	1.1	1.0002	1.0581
	D2	0.35	0.42485	0.37862
	FA	15.60	16.001	16.100
	FB	18.55	17.999	17.903
	FN	16.91	16.814	16.796
	DIF = β1-β2	0	-0.00578	-0.09884
	volume	0.334	0.280	0.310
	Time(S)	-	280	1920

Table 2 shows the results of the hybrid and SP methods for the first case when considering a given interval [16,18] Hz. The value of f_n presents the equality of reliability indices. The SP method reduces the computing time by 85% relative to the hybrid method. The advantage of the SP method is simple to be implemented on the machine and to define the eigen-frequency of a given interval and provides the designer with reliability-based optimum solution with a small tolerance relative to the hybrid method. So this method can be also a conjoint of the OSF method.

Case 2: Symmetric: $u_i^a = -\ u_i^b$ or $\left|u_i^a\right| = \left|u_i^b\right|$

1- HM procedure: We minimize the multiplicative form of the objective function subject to the different frequencies constraint and the reliability one as follows:

$$\begin{aligned}
\min\ &: Vol_n\left(m_A,...,m_D\right).\ d_{\beta a}\left(A_a,...,D_a,m_A,...,m_D\right).\ d_{\beta b}\left(A_b,...,D_b,m_A,...,m_D\right)\\
\text{s.t}\ &: d_{\beta a}\left(A_a,...,D_a,m_A,...,m_D\right)-d_{\beta b}\left(A_b,...,D_b,m_A,...,m_D\right)=0\\
&: u_A^a(A_a,m_A)+u_A^b(A_b,m_A)=0\\
&: u_B^a(B_a,m_B)+u_B^b(B_b,m_B)=0\\
&: u_C^a(C_a,m_C)+u_C^b(C_b,m_C)=0\\
&: u_D^a(D_a,m_D)+u_D^b(D_b,m_D)=0\\
&: freq^a(A_a,B_a,C_a,D_a)-f_a\le 0\\
&: freq^b(A_b,B_b,C_b,D_b)-f_a\le 0
\end{aligned} \tag{19}$$

2- SP procedure: We have two simple optimization problems and a model evaluation:

- The *first* is to minimize the objective function of the first model subject to the frequency f_a constraint as follows:

$\min\ : Vol_a\left(A_a,B_a,C_a,D_a\right)$ s.t. $: freq^a(A_a,B_a,C_a,D_a)-f_a\le 0$ (20)

- The *second* is to minimize the objective function of the second model subject to the frequency f_b constraint as follows:

$\min\ : Vol_b\left(A_b,B_b,C_b,D_b\right)$ s.t. $: freq^b(A_b,B_b,C_b,D_b)-f_b\le 0$ (21)

- The model evaluation leads to analytically compute the mean values corresponding to the frequency f_n

$$m_A=\frac{A_a+A_b}{2} \tag{22}$$

$$m_B = \frac{B_a + B_b}{2} \quad (23)$$

$$m_C = \frac{C_a + C_b}{2} \quad (24)$$

$$m_D = \frac{D_a + D_b}{2} \quad (25)$$

That leads to $Vol_n(m_A, m_B, m_C, m_D)$ and $f_a < freq^n(m_A, m_B, m_C, m_D) < f_b$.

Table 3 shows the results of the hybrid and SP methods for the second case when considering a given interval [16,18] Hz. The value of f_n presents the equality of reliability indices and the equality case $u_i^a = - u_i^b$. The SP method reduces the computing time by 91% relative to the hybrid method. In the hybrid problem (19), we need a high computing time because of the big number of optimization variables and of constraints relative to hybrid problem (15). The advantage of the SP method is simple to be implemented on the machine and to define the eigen-frequency of a given interval and provides the designer with reliability-based optimum solution with a small tolerance relative to the hybrid method. So this method can be also a conjoint of the OSF method.

Table 3

Таблица 3

Results of the aircraft wing for the second case

Результаты применения методов для второго случая

	Variables	Initial design	Optimum design with SP	Optimum design with HM
FN	A	0.04	0.04028	0.04204
	B	0.05	0.04046	0.04664
	C	1	0.95020	0.9979
	D	0.425	0.46234	0.42683
FA	A1	0.02	0.02730	0.02639
	B1	0.02	0.02004	0.02615
	C1	0.9	0.90021	0.90971
	D1	0.5	0.49983	0.49124
FB	A2	0.06	0.05346	0.05739
	B2	0.08	0.06088	0.06669
	C2	1.1	1.0002	1.0921
	D2	0.35	0.42485	0.36206
	FA	15.60	16.001	16.100
	FB	18.55	17.999	17.908
	FN	16.91	16.920	16.874
	DIF = β1-β2	0	-0.00578	0.10125
	surface	0.334	0.279	0.320
	Time(S)	-	230	2700

Conclusion

A RBDO solution that reduces the structural weight in uncritical regions both provides an improved design and a higher level of confidence in the design. The classical RBDO approach can be carried out in two separate spaces: the physical space and the normalized space. Since very many repeated searches are needed in the above two spaces, the computational time for such an optimization is a big problem. The structural engineers do not consider the RBDO as a practical tool for design optimization. Fortunately, an efficient method called the Hybrid Method (HM) has been elaborated where the optimization process is carried out in a Hybrid Design Space (HDS). However, the vector of variables here contains both deterministic and random variables. The RBDO problem by HM is thus more complex than that of deterministic design. The major difficulty lies in the evaluation of the structural reliability, which is carried out by a special optimization procedure. The use of HM necessitates a high computing time and a complex implementation. The SP method is proposed to overcome this drawback. As it is shown in the numerical application on a composite aircraft wing under free vibrations, the SP method can reduce efficiently the computing time relative to the HM.

References

1. Feng Y.S., Moses , F. A method of structural optimization based on structural system re-liability. J. Struct. Mech., 1986, no.14, pp.437-453.

2. TU J, Choi, K.K., Park, Y.H. A new study on reliability-based design optimization. Journal of Mechanical Design, ASME, 1999, no. 121(4), pp. 557-564.

3. Kharmanda, G., Mohamed, A., Lemaire, M. Efficient reliability-based design optimization using hybrid space with application to finite element analysis. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, no. 24, pp.233-245.

4. Kharmanda, G., Antypas, I.R. Reliability-Based Design Optimization Strategy for Soil Tillage Equipment Considering Soil Parameter Uncertainty.]Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 2 (85), pp. 136-147.

5. Kharmanda, G., Antypas, I.R. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya Sbornik statey 10-y Mezhdunarodnoy yubileynoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh 20-y Mezhdunarodnoy agropro-myshlennoy vystavki "Interagromash-2017". [State and prospects of agricultural engineering development: Proc. 10th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of 20th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2017”.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2017, pp. 174-176.

6. Kharmanda, G., Antypas, I.R. System reliability-based design optimization using optimum safety factor with application to multi failure fatigue analysis. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya Sbornik statey 10-y Mezhdunarodnoy yubileynoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh 20-y Mezhdunarodnoy agropro-myshlennoy vystavki "Interagromash-2017". [State and prospects of agricultural engineering development: Proc. 10th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of 20th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2017”.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2017, pp. 177-179.

7. Hasofer, A.M., Lind, N.C. An exact and invariant first order reliability format. J. Eng. Mech, ASCE, EM1, 1974, iss. 100, pp. 111-121.

8. Kharmanda, G., Antypas, I.R. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design. Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 2 (81), pp. 22-31.

9. Grandhi, R.V., Wang, L. Reliability-based structural optimization using improved two-point adaptive nonlinear approximations. Finite Elements in Analysis and Design, 1998, no. 29, pp. 35-48.

Библиографический список

1. Feng Y.S. A method of structural optimization based on structural system reliability/ Y.S.Feng, F. Moses // J. Struct. Mech. - 1986 -14, P.437-453.

2. TU J. A new study on reliability-based design optimization / TU J., K.K. Choi., Y.H. Park //Journal of Mechanical Design, ASME - 1999 -121(4), 557-564

3. Kharmanda G. Efficient reliability-based design optimization using hybrid space with application to finite element analysis/ G. Kharmanda, A. Mohamed, M. Lemaire // Structural and Multidisciplinary Optimization- 2002- 24, P.233-245.

4. Kharmanda G. Reliability-Based Design Optimization Strategy for Soil Tillage Equipment Considering Soil Parameter Uncertainty / G. Kharmanda, I.R. Antypas // Vestnik of DSTU, vol. 16 (2), pp 136-147, 2015. ISSN 1992-5980.

5. Kharmanda G.: Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns / G. Kharmanda, I. Antypas //10-th International Scientific-Practical Conference of Current Status and Prospects of Agricultural Engineering, “INTERAGROMASH-2017”. 1-3 March, 2017, Rostov-on-Don, Russia, DSTU Publ. Centre, pp. 174-176.

6. Kharmanda G. System reliability-based design optimization using optimum safety factor with application to multi failure fatigue analysis / G. Kharmanda, I. Antypas // 10-th International Scientific-Practical Conference of Current Status and Prospects of Agricultural Engineering, “INTERAGROMASH-2017”, 1-3 March, 2017, Rostov-on-Don, Russia, DSTU Publ. Centre, pp. 174-176.

7. Hasofer A.M. An exact and invariant first order reliability format / A.M. Hasofer, N.C. Lind // J. Eng. Mech, ASCE, EM1- 1974 - 100, P.111-121.

8. Kharmanda G. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design / G. Kharmanda, I. Antypas // Vestnik of DSTU - 2015 - vol. 15 (2), P. 22-31, 2015. ISSN 1992-5980.

9. Grandhi R.V. Reliability-based structural optimization using improved two-point adaptive nonlinear approximations /R.V. Grandhi, L. Wang // Finite Elements in Analysis and Design – 1998 -29, P.35-48.

Поступила в редакцию 24.03.2017
Сдана в редакцию 24.03.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 24.03.2017
Submitted 24.03.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторе:
Гиас Харманда,
приглашенный научный сотрудник кафедры биомедицинской инженерии Лундского университета (Ole Römersväg 1, Box 118, 221 00 Lund, Sweden),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8344-9270
ghias.kharmanda@bme.lth.se

Author:
Ghias Kharmanda,
guest researcher of the Department of Biomedical Engineering, Lund University (Ole Römersväg 1, Box 118, 221 00 Lund, Sweden),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8344-9270
ghias.kharmanda@bme.lth.se

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.193.1:621.165.51 10.23947/1992-5980-2017-17-2-56-69

К проблеме водородного охрупчивания стали при каплеударной эрозии*

О. В. Кудряков[1], В. Н. Варавка[2], В. А. Ирха[3], И. В. Моисеева[4]**

[1, 2, 4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[3]Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

To problem of hydrogen embrittlement of steel at droplet impingement erosion ***

O. V. Kudryakov[1], V. N. Varavka[2], V. A. Irkha[3], I. V. Moiseeva[4]**

[1, 2, 4]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[3]Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Введение. Работа посвящена проблеме насыщения водородом поверхностного слоя стальных изделий при их высокоскоростных соударениях с воднокапельным потоком. В ряде публикаций высказывалась гипотеза о диссоциации молекул воды при высокоскоростных капельных соударениях. Некоторые экспериментальные данные говорили в пользу этой гипотезы. Следствием такой диссоциации является водородное охрупчивание поверхностного слоя металла. Целью работы являлась расчетно-экспериментальная проверка указанного механизма эрозионного разрушения стальной поверхности.

Материалы и методы. Для расчетно-аналитических оценок рассмотрены энергетические уравнения различных путей диссоциации молекул воды. Использованы уравнения Тэйта и Ван-дер-Ваальса с учетом изменения фазовых состояний воды при соударении. Экспериментальные данные получены на основе спектрального анализа с использованием видимого монохроматического (качественный анализ) и инфракрасного (количественный анализ) излучений.

Результаты исследования. Предложен усовершенствованный расчетный аппарат для определения энергетического уровня диссоциации молекул воды и выделения свободного водорода с учетом сжимаемости воды при реально достижимых скоростях соударений. Представлены также результаты спектральных исследований пузырьковых треков, формирующихся на экспериментальных стальных образцах при стендовых эрозионных испытаниях. Спектральный анализ показал, что треки составлены из пузырьков воздуха. Свободный водород в них не обнаружен.

Обсуждение и заключения. Полученные в работе расчетно-экспериментальные данные не дают оснований для подтверждения гипотезы о диссоциации водорода при воднокапельных соударениях со стальной поверхностью в диапазоне скоростей соударения 200–600 м/с. Поэтому механизм водородного охрупчивания, по-видимому, должен быть исключен из числа аддитивных компонентов каплеударного эрозионного износа.

Introduction. The work is devoted to the problem of the hydrogen saturation of steel parts skin at their high-speed impacts with a water-drop flow. A hypothesis of the water molecules dissociation at high-speed drop impacts was suggested in a number of papers. This hypothesis was confirmed by some experimental data. The effect of this dissociation is hydrogen embrittlement of the metal surface layer. The work objective is the calculation and experimental verification of the given mechanism of the erosion destruction of the steel surface.

Materials and Methods. Energy equations of various ways of the water molecules dissociation are considered for the calculation-analytical estimates. The Tate and van der Waals equations are used with allowance for the change in the phase states of water at impact. Experimental data are obtained on the basis of spectral analysis using visible monochromatic (qualitative analysis) and infrared (quantitative analysis) emissions.

Research Results. An improved calculation apparatus is proposed to determine the energy level of the water molecules dissociation and free hydrogen release with account for the compressibility of water at achievable impact speeds. The results of spectral studies of bubble tracks formed on the experimental steel samples under the bench erosion tests are presented. The spectral analysis shows that the tracks are composed of air bubbles. Free hydrogen is not detected in them.

Discussion and Conclusions. The calculated and experimental data obtained in this paper do not give grounds for confirming the hypothesis of hydrogen dissociation under the water-drop impacts with a steel surface in the impact velocity range of 200-600 m / s. Therefore, the mechanism of hydrogen embrittlement, apparently, should be excluded from the number of additive components of the droplet impingement erosive wear.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-06181).

**E-mail: kudryakov@mail.ru, varavkavn@gmail.com, v-irx@rambler.ru, irisena@mail.ru

*** The research is done with the financial support from RFFI (grant no. 15-08-06181).

Ключевые слова: каплеударная эрозия, кавитация, диссоциация молекул воды, водородное охрупчивание стали, спектральный анализ.

Keywords: droplet impingement erosion, cavitation, dissociation of water molecules, hydrogen embrittlement of steel, spectrographic analysis.

Введение. В работах [1–3] высказывалась гипотеза о диссоциации молекул воды с образованием атомарного водорода при высокоскоростном соударении капель с металлической поверхностью. Предполагалось, что деградация металлической поверхности при динамическом контакте с воднокапельным потоком имеет водородную составляющую. То есть при высокоскоростном капельном соударении происходит диссоциация молекул воды, насыщение поверхности металла атомарным водородом, который становится источником водородного охрупчивания. Гипотеза основывалась на экспериментальных результатах. Во-первых, речь идет о пузырьковых треках, исходящих от стальных образцов, погруженных в глицерин сразу после стендовых испытаний на каплеударном эрозионном стенде (рис. 1).



Рис. 1. Пузырьковые треки в глицерине после стендовых эрозионных испытаний стальных образцов

Fig. 1. Bubble tracks in glycerine after bench erosion testing of steel samples

Во-вторых, был отмечен специфический характер начальных стадий износа образцов, при котором образование первичных эрозионных кратеров на поверхности металла напоминало механизм водородного охрупчивания (рис. 2).

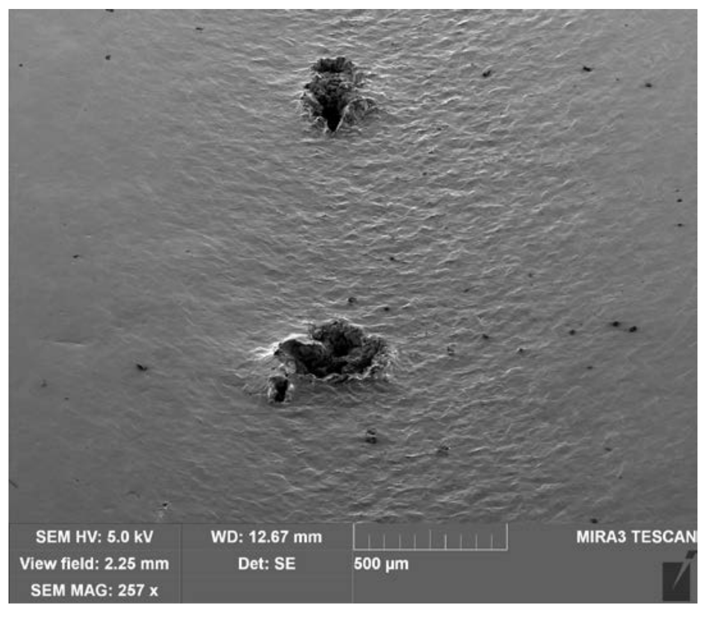


Рис. 2. Первичные эрозионные кратеры на поверхности металла, предположительно водородного происхождения

Fig. 2. Primary erosion craters on metal surface, hypothetically, of hydrogen origin

Гипотеза и тесно с нею связанная проблема деградации стальной поверхности при каплеударной эрозии требовали более глубокого изучения, прежде всего выяснения состава газовых пузырьков, образующих треки. С этой целью была разработана методика отбора газовых проб для исследования химического состава пузырьковых треков (рис. 3).

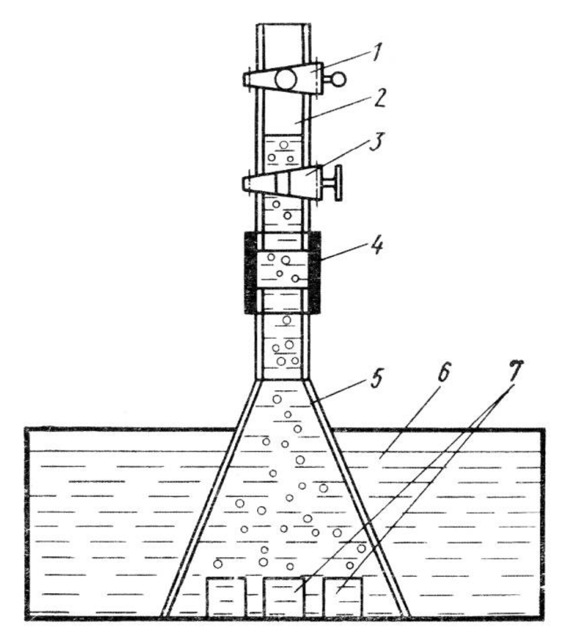


Рис. 3. Схема отбора газа, выделяющегося из образца, по методике В. Я. Матюшенко: 1, 3 — краны; 2 — собранный в микробюретке газ; 4 — резиновая трубка (переходник); 5 — стеклянная воронка; 6 — ванна с глицерином; 7 — стальные образцы [4]

Fig. 3. Scheme of gas extraction from the sample according to V. Ya. Matyushenko's method: 1, 3 - cranes; 2 - gas collected in microburette; 4 - rubber tube (adapter); 5 - glass funnel; 6 - bath with glycerin; 7 - steel samples [4]

Выполненный хроматографический анализ полученных проб показал повышенное содержание водорода. Однако результаты, на которые опиралась рассматриваемая гипотеза, носили пробный качественный характер, не подкреплялись повторяемостью. К тому же из образца выделялся очень малый объем газа. В связи с этим требовалось длительное время для сбора объема газовой пробы, достаточного для достоверности результатов (в частности, для проведения спектрального анализа). Поэтому исследования состава газа необходимо было продолжить с использованием более надежных спектрометрических методов. Прежде чем изложить их результаты, следует остановиться на аналитической части проблемы.

Расчетная модель диссоциации молекул воды при соударениях. Вода является активным компонентом во многих областях техники и технологии. Поэтому к настоящему времени энергетические состояния воды достаточно хорошо изучены. Например, процессы диссоциации и ионизации молекул воды, пара и газов при схлопывании кавитационных пузырьков в ходе ультразвуковой кавитации исследованы экспериментально масс-спектроскопическими методами в работе [5].

При соударении капли с металлической поверхностью молекулы воды получают энергию за счет так называемых ударов первого рода Франка — Герца, в результате которых кинетическая энергия сталкивающихся частиц превращается в энергию возбуждения или приводит к ионизации. Уровень энергетических затрат, необходимых для диссоциации и ионизации воды, может быть определен в виде потенциалов появления ионных фрагментов при диссоциации молекул воды E_{ap} и минимальных энергий осуществления элементарных каналов диссоциации воды E_{Dmin} (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Наиболее вероятные элементарные процессы диссоциации молекулы воды и минимальная энергия для их реализации [5–7]

Most probable elementary processes of water molecule dissociation and minimum energy for their implementation [5-7]

№ реакции	Каналы диссоциации молекул воды с образованием различных ионов	Энергия E_{Dmin}	
		эВ	кДж/моль
1	$H_2O + e^- \to OH + H^-$	4,47	434,12
2	$H_2O + e^- \to 2H + O^-$	7,32	706,38
3	$H_2O \to H_2O^+ + e^-$	12,6	1215,9
4	$H_2O + e^- \to H + H^+ + O^-$	17,6	1698,4
5	$H_2O \to H_2 + O^+ + e^-$	18,6	1794,9
6	$H_2O \to H + OH^+ + e^-$	18,7	1804,55
7	$H_2O \to OH + H^+ + e^-$	18,72	1806,48
8	$H_2O \to H_2^+ + O + e^-$	20,5	1978,25

При энергетической активации воды (облучение, ультразвук, гидроудар и т. д.) пороговые значения энергии, необходимой для появления первых ионов, улавливаемых масс-спектрометром высокой чувствительности (например, монопольным прибором МХ730А [6]), составляют:
ионы: H_2O^+…… OH^+…… H^+…… O^+…… H^-…… O^-…… H_2^+
E_{ap}, эВ: 12,6 …… 18,12 … 16,95 … 19,0 … 5,6 …... 23,7 … 20,7
E_{ap}, кДж/моль: 1216 …… 1749 …. 1636 … 1834 … 540 …. 2287 … 1998.

Низший потенциал образования имеет ион H^-, однако его выход (количество в общей массе) относительно невелик, как и ионов O^- и H_2^+ при энергетической накачке воды. Основными ионами при диссоциации молекул H_2O являются H_2O^+ и OH^+: в процентном соотношении ионов H^+ и O^+ образуется в несколько раз меньше, но на порядок больше, чем H^-, O^-, H_2^+. В связи с этим в отношении данных, представленных в табл. 1, следует сделать ряд замечаний.

1. Реакции 1, 2 и 4 в процессах гидроудара и кавитации являются вторичными.
2. Наиболее вероятна реакция 3, так как относительное количество ионов H_2O^+ превышает сумму всех остальных первичных продуктов расщепления воды [5].
3. Радикал OH образуется главным образом по реакции 7.
4. Образование атомов водорода с наибольшей вероятностью осуществляется по реакции 6.

Таким образом, для осуществления диссоциации молекул воды с выделением атомов или ионов водорода при каплеударной эрозии необходимо достижение уровня энергетической активации в зоне соударения как минимум 500 кДж/моль, а для полноценного насыщения поверхности металла активным водородом — не менее 1800 кДж/моль.

Сделаем оценки уровня энерговыделения в зоне контакта при однократном высокоскоростном капельном соударении.

Кинетика жидкокапельных соударений с гладкой, твердой, плоской поверхностью обычно исследуется с помощью компьютерного моделирования и скоростной видеосъемки. Видео позволяет описать трансформацию формы капли, а объектом моделирования являются внутренние параметры капли — плотность жидкости, давление, кинетическая энергия и другие характеристики. Работы [8–10] характеризуют процессы, происходящие в капле при соударении, как гидродинамическую кавитацию. Моделирование, например, плотности жидкости в капле строится на основе баротропного уравнения Тэйта, связывающего локальное относительное изменение плотности по объему капли $y = \rho/\rho_0$ с давлением P [9]:

$$P = B \cdot (y^{\gamma} - 1) + P_0 . \quad (1)$$

Здесь для воды при температуре 20–60 °C полагают: $B = 3{,}214 \cdot 10^8$ Па; $\gamma = 7$; $P_0 = 10^5$ Па — нормальное давление; $\rho_0 = 10^3$ кг/м^3 — плотность невозмущенной жидкости.

Взаимодействие отраженной ударной волны со свободной поверхностью капли имеет сложный характер. Моделирование этого процесса демонстрирует последовательное образование и схлопывание двух кавитационных полостей [10]: тороидальной и осевой. Гидродинамические удары, сопровождающие схлопывание этих кавитационных полостей, генерируют два пика [9] в периодической функции давления на поверхности контакта капли и мишени $P = f(t)$, представленной на рис. 4 в форме выражения:

$$P = \rho_0 \cdot c_0 \cdot V_0 \cdot \frac{\sin\left(\sqrt{2\pi} \cdot t\right) + \alpha}{\sqrt{2\pi} \cdot \left(t + t^{-1}\right)}. \qquad (2)$$

Здесь $c_0 = \sqrt{\frac{B \cdot \gamma}{\rho_0}}$ — скорость звука в жидкости при нормальных условиях, м/с; $t = \omega\tau = \frac{\pi \cdot V_0}{R_0}$ — безразмерное время, максимальное значение (2π) которого соответствует физическому времени τ одного соударения и определяет период $T = 2\pi/\omega$ затухающей функции $P(t)$; $\alpha = 1{,}8$; B и γ — константы из уравнения Тэйта (1).

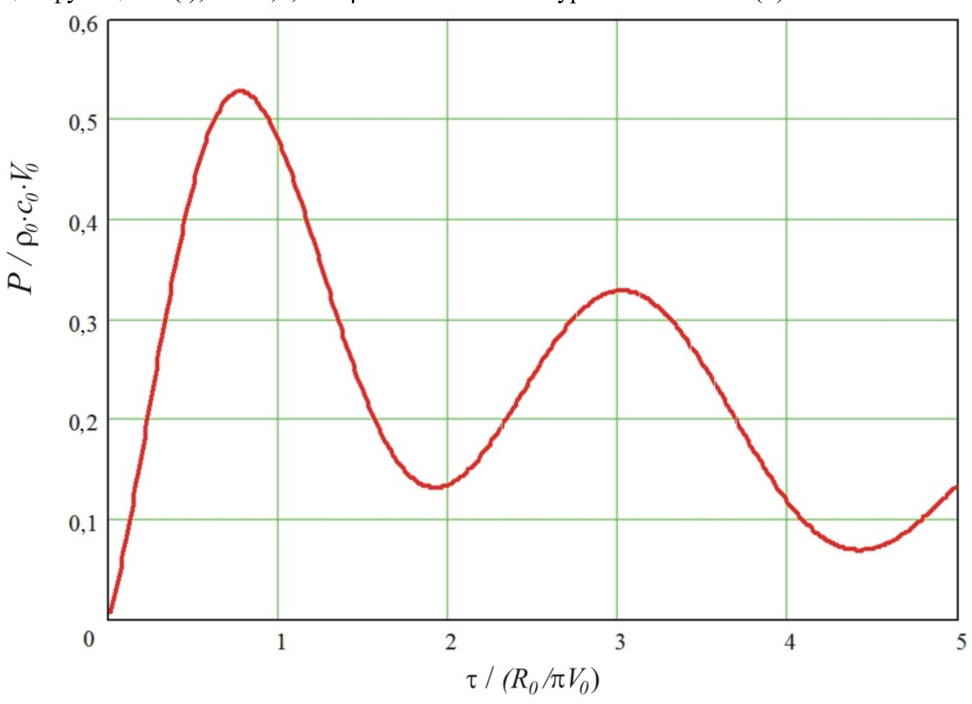


Рис. 4. Изменение давления P на поверхность мишени за период соударения t (относительные единицы)

Fig. 4. Change in pressure P on target surface during impact period t (relative units)

На рис. 4 функция давления выражена в относительных единицах $\rho_0 \cdot c_0 \cdot V_0$, называемых акустическим приближением, поскольку размерность включает скорость звука c_0. Такое приближение используется в большинстве работ, моделирующих удар капли.

Тогда механическая составляющая энергии соударения может быть вычислена:

$$E_m = P_M \cdot \Omega_K, \qquad (3)$$

где P_M — максимум давления в функции (2), показанной на рис. 4; Ω_K — объем капли.

Из рис. 4 ясно, что максимальный вклад в механическую составляющую энерговыделения при соударении вносит гидродинамическая кавитация: схлопывание тороидальной кавитационной полости генерирует первый максимум давления на рис. 4 при $t = 0{,}77$, а схлопывание осевой кавитационной полости — второй максимум при $t = 3{,}03$.

Энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных полостей объемом $\Omega_П$, определяется как:

$$E_K = P_K \cdot \Omega_П. \qquad (4)$$

Здесь P_K — вклад кавитационной составляющей в функцию давления (2) вычисляется как разность давлений ближайших максимумов и минимумов в функции $P = f(t)$ выражения (2):

— для схлопывания тороидальной полости $P_{K1} = P_1^{max}|_{t=0,77} - P_1^{min}|_{t=1,91}$;

— для схлопывания осевой полости $P_{K2} = P_2^{max}|_{t=3,03} - P_2^{min}|_{t=4,40}$.

Определение размеров кавитационных полостей представляет собой большие трудности и может быть получено только моделированием. Однако задачей является вычисление уровня энергетической активации соударения. В этой связи следует отметить, что:

— во-первых, размер полости $\Omega_П$ существенно меньше размера капли Ω_K;

— во-вторых, вклад кавитации P_K в функцию давления также меньше максимумов P_M этой функции.

Поэтому выражение (3) даст заведомо большие значения, чем (4). Выражение (3) является более общим, включая в себя выражение (4), поэтому для вычисления уровня энергозатрат будем использовать его. Однако для

сравнения с данными табл. 1 E_m следует вычислять как молярную энергию. В этом случае формулу (3) следует записать:

$$E_M = P_M \cdot \rho_0^{-1} \cdot M_{H2O}\,, \qquad (5)$$

где ρ_0 — плотность невозмущенного эродента (водяной капли); M_{H2O} = 18 г/моль — молярная масса воды.

Прежде чем выполнить энергетические расчеты, учтем, что в процессе соударения давление имеет двойной максимум, что, по-видимому, может влиять на общий уровень энерговыделения в зоне контакта. Результаты вычислений для различных значений параметра соударения V_0 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Барометрические характеристики энерговыделения при соударениях водяных капель с гладкой плоской металлической поверхностью (расчетные данные)

Barometric characteristics of energy release under impacts of water droplets with smooth flat metal surface (calculated data)

Скорость соударения V_0, м/с	Акустический max давления $P_k = \rho_0 \cdot c_0 \cdot V_0$, МПа	Экстремумы функции гидродинамического давления по формуле (2), МПа				Механическая составляющая энергии соударения по формуле (5), кДж/моль	
		P_{M1}^{max}	P_1^{min}	P_{M2}^{max}	P_2^{min}	E_{M1}	E_{M2}
150	225	118,7	29,6	73,9	15,5	2,14	1,33
250	375	197,9	49,35	123,2	25,9	3,56	2,22
400	600	316,6	79,0	197,1	41,4	5,70	3,55
600	900	474,9	118,4	295,6	62,1	8,55	5,32

В дополнение к полученным данным может быть вычислена термическая составляющая энергии соударения. Ее физический смысл заключается в следующем. Из данных табл. 2 следует, что при исследуемых скоростях соударения давление в зоне контакта достигает уровня 100–500 МПа. Расчеты и моделирование, выполненные в работах [8–10], показывают, что температура в зоне контакта может доходить до 760 К [10]. Эти значения (особенно давление) существенно превышают критические параметры для воды: $P_к$ = 22,12 МПа; $T_к$ = 647,3 К; $V_к = 56{,}3 \cdot 10^{-6}$ м^3/моль; $\rho_к$ = 320 кг/м^3 [11]. В соответствии с фазовой диаграммой (рис. 5) вода при таких параметрах находится в состоянии сжимаемой или сверхкритической жидкости.

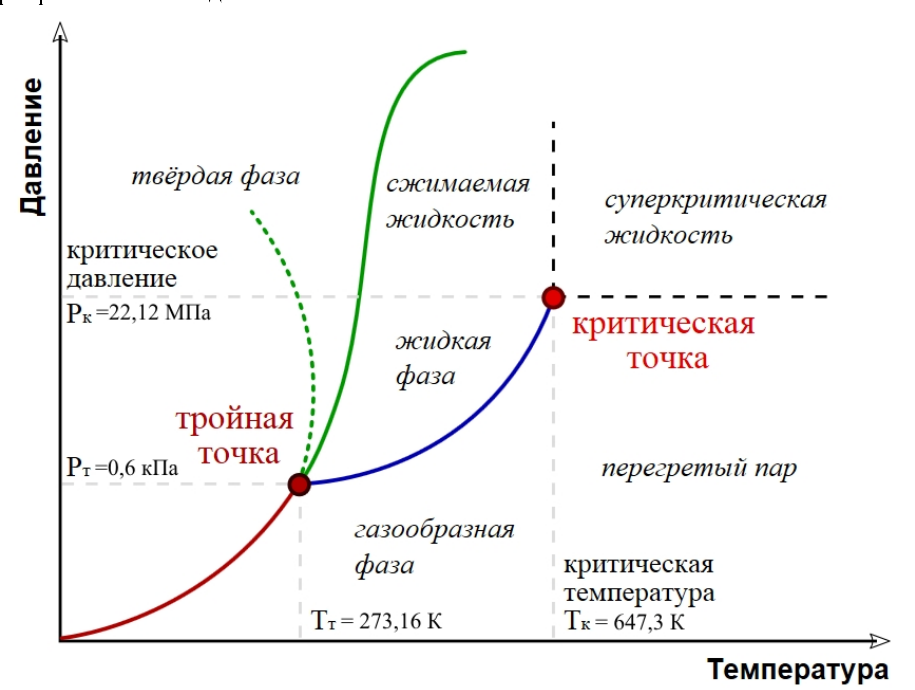


Рис. 5. Фазовая диаграмма воды в координатах $P - T$

Fig. 5. Phase diagram of water in $P - T$ coordinates

Сверхкритическое фазовое состояние воды не определяет его агрегатного состояния, то есть считается, что различие между жидким и газообразным состоянием в этом случае исчезает. В сверхкритическом фазовом состоянии

вода, во-первых, становится сжимаемой. Во-вторых, для ее параметрического $P–V–T$-описания могут быть использованы газовые термодинамические модели. В частности, наряду с баротропным уравнением Тэйта (6), применяемым для описания свойств реальных газов и жидкостей, может быть использовано уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов (7). Также следует учитывать фактор сжимаемости Z, определяемый соотношением (8).

$$\frac{V}{V_0} = 1 - C \cdot \ln\frac{B+P}{B+P_0}, \quad (6)$$

$$(P + \frac{a}{V^2}) \cdot (V - b) = R \cdot T, \quad (7)$$

$$Z = \frac{P \cdot V_M}{R \cdot T}. \quad (8)$$

Здесь B и C — константы, определяемые экспериментально; отношение объемов V/V_0 в выражении (6) может быть заменено на обратное отношение плотностей ρ_0/ρ; $a = 0{,}5524$ (Н·м^4)/моль^2; $b = 30{,}413 \cdot 10^{-6}$ м^3/моль — константы в уравнении Ван-дер-Ваальса, определяемые через критические параметры [11]; V_0 — молярный объем; $R = 8{,}3145$ Дж/(К·моль) — универсальная газовая постоянная.

Для расчета термической составляющей энергии соударения уравнение Ван-дер-Ваальса (7) не может быть использовано по следующим причинам. На рис. 6 проиллюстрированы результаты расчета по уравнению Ван-дер-Ваальса.

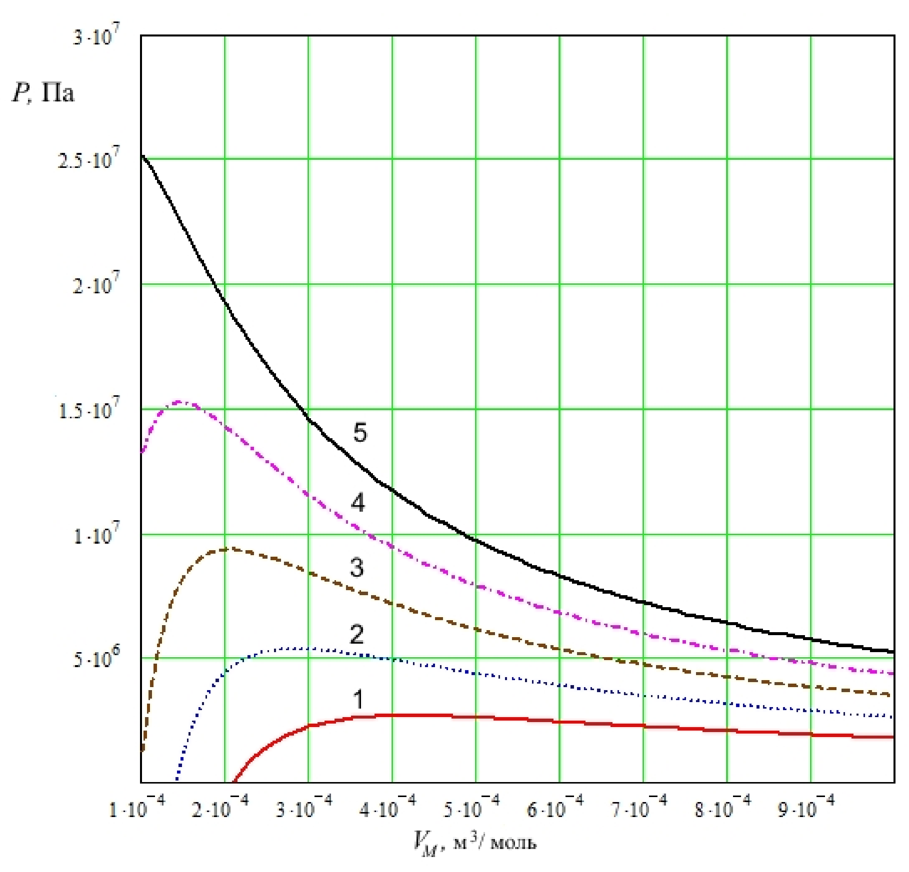


Рис. 6. Расчетные кривые в координатах P—$V_М$, полученные по уравнению Ван-дер-Ваальса для фиксированных значений температуры: 1 — 273 К; 2 — 373 К; 3 — 473 К; 4 — 573 К; 5 — 673 К

Fig. 6. Calculated curves in P—$V_М$ coordinates obtained from van der Waals equation for fixed temperature values: 1 — 273 K; 2 — 373 K; 3 — 473 K; 4 — 573 K; 5 — 673 K

Все кривые на рисунке имеют максимум, который не может быть превышен. Причем для критической температуры $T_к = 647{,}3$К этот максимум соответствует критическому давлению $P_к = 22{,}12$ МПа (на рис. 6 эта кривая не показана, она должна находиться между кривыми 4 и 5). То есть по уравнению Ван-дер-Ваальса сверхкритическое состояние вещества недостижимо в принципе, а изменение характера зависимости $P–V$ на графиках рис. 6 (появление максимума давления при уменьшении объема) отражает наличие фазового перехода в системе в точке P_{max}. В математической форме возможности уравнения Ван-дер-Ваальса ограничены разностью $V - b$, которая указывает на то, что $V_M > b$, иначе давление становится нулевым или отрицательным. Кроме того, если сравнить эмпирическое значение

$b = 30{,}413 \cdot 10^{-6}$ м^3/моль, используемое в уравнении Ван-дер-Ваальса, и расчетное $b = 0{,}33 \cdot V_к = 18{,}8 \cdot 10^{-6}$ м^3/моль, то они не совпадают.

Это также может служить косвенным свидетельством того, что в уравнении Ван-дер-Ваальса не учитывается фактор сжимаемости, который в случае соударения капли с поверхностью металла весьма важен.

В отличие от уравнения Ван-дер-Ваальса (7), фактор сжимаемости Z, определяемый соотношением (8), может использоваться для характеристики любого фазового состояния воды [11]. Уравнение Тэйта (6) фактически также характеризует сжимаемость жидкости через соотношение V/V_0. Однако для энергетических расчетов удобнее использовать более простое выражение (8), где произведение $R \cdot T$ задает уровень тепловой энергии идеального газа, а фактор сжимаемости Z корректирует его применительно к реальному газу или к сжимаемой/сверхкритической жидкости.

Выполним оценочные расчеты значений фактора сжимаемости для случая капельных соударений. Величина Z может быть определена в зависимости от приведенных значений температуры $T_r = T/T_к$ и давления $P_r = P/P_к$, то есть $Z = f(T_r; P_r)$. Для капельных соударений по данным исследований [8–10]: $T = 620…760$ К и $P = 120…1150$ МПа, что соответствует $T_r = 0{,}96…1{,}17$ и $P_r = 5{,}5…52$. Вариация значений T_r незначительна, и ее можно принять как $T_r \approx 1$. Из достаточно широкого интервала значений P_r выберем такой, который соответствует условиям проведенных нами стендовых эрозионных испытаний, то есть данным табл. 2: $P_r = 5{,}5…21{,}5$. Для случая $T_r \approx 1$ в соответствии с номограммами, приведенными в источниках [11] или [12], величина Z практически прямо пропорциональна P_r и описывается зависимостью:

$$Z = 0{,}1 \cdot P_r + 0{,}25. \tag{9}$$

Тогда максимально достижимое значение фактора сжимаемости при каплеударной эрозии в условиях стендовых испытаний — $Z = 2{,}4$, а предельный уровень термической составляющей энергии соударения E_T, определяемый соотношением

$$E_T = P \cdot V_M = Z \cdot R \cdot T, \tag{10}$$

не превысит 15,5 кДж/моль.

Таким образом, расчеты показывают, что однократное капельное высокоскоростное соударение не может обеспечить уровень выделения энергии, необходимый для диссоциации молекул воды. Так, механическая составляющая энергии в зоне соударения из табл. 2 с учетом двойного кавитационного удара при максимально достижимой скорости соударения $V_0 = 600$ м/с составит $E_{M1} + E_{M2} \approx 14$ кДж/моль. В этом случае совокупное значение максимальной энергии в зоне соударения, включающее механическую $E_{M2} \approx 14$ кДж/моль и термическую $E_T \approx 15{,}5$ кДж/моль составляющие, не превысит 30 кДж/моль, что не сопоставимо со значениями энергии активации, необходимой для диссоциации молекул воды с образованием атомарного или ионизированного водорода, приведенных в табл. 1. Однако такой результат оставляет открытым вопрос о происхождении пузырьковых треков, наблюдавшихся экспериментально (см. рис. 1). Для ответа необходимо определение химического состава пузырьков, выделяющихся из образцов в виде треков. Этому исследованию посвящен следующий раздел.

Химический анализ пузырьковых треков. Если пузырьки выделяющегося из образца газа принадлежат водороду, то водород, собранный по методике, приведенной на рис. 3, находится в микробюретке в молекулярном состоянии. Состояние газа (атомарное или молекулярное) может быть выявлено при спектральном анализе: атомарное состояние дает линейчатый спектр *излучения*, а молекулярное — полосатый. Если же спектральный анализ проводится в виде спектров *поглощения*, то практически не видна разница атомарного и молекулярного спектров при исследовании на монохроматорах: универсальных (типа УМ-2) или малогабаритных (типа МДР-23 или МДР-204).

При исследовании состава газа, собранного по указанной методике, получить его спектр *излучения* не представляется возможным, так как для этого необходимо его собрать, а затем перекачать в полость газоразрядной лампы, что не гарантирует чистоту пробы из-за возможного контакта с атмосферным воздухом. Поэтому собранный газ анализировался в монохроматоре по спектрам *поглощения* путем просвечивания колбы с пробой газа. Таким образом, выбранный метод анализа состава газа следует отнести к *молекулярному спектральному анализу*, который как раз и определяет молекулярный состав веществ по молекулярным спектрам поглощения, люминесценции или комбинационного рассеяния света. Для проведения такого анализа использовался монохроматор УМ-2, который может работать в качестве монохроматора и спектроскопа в спектральной области 380÷1000 нм. При работе с ним на оптическую ось прибора выводится параллельный пучок лучей определенного узкого интервала длин волн. Поворачивая призменный столик монохроматора с помощью барабана, на выходную щель проектируют различные спектральные участки.

В проведенном исследовании газовой пробы использовался визуальный метод наблюдения с помощью окуляра, который устанавливается вместо щели. При этом в поле зрения окуляра оказывается не одна линия (как за выходной щелью), а несколько (то есть фрагмент спектра). Для установки положения спектральной линии в плоскости выходной щели имеется индекс в виде иглы-указателя. Индекс наблюдается через окуляр. При визуальном наблюдении,

когда выходная щель заменяется насадкой со сменными окулярами, монохроматор УМ-2 превращается в спектроскоп постоянного отклонения.

Микробюретка с исследуемым образцом газа устанавливалась между выходным отверстием осветителя и входной щелью монохроматора. В работе использовался осветитель с галогенной лампой КГЛ-20, заключенной в корпус с зеркально-линзовым конденсором. Благодаря конденсору на выходе параллельный пучок излучения обеспечивает сплошной спектр в диапазоне 350–3500 нм.

Задачей проводимого спектрального исследования было определение состава собранного газа. Независимо от результата исследования спектральный анализ носил *качественный* характер, поскольку должен был подтвердить либо опровергнуть гипотезу о диссоциации капель воды при соударении с поверхностью металла на кислород и водород с последующей локализацией водорода в местах дефектов структуры и несплошностей металла. Поэтому при спектральном исследовании достаточно было выяснить, какой газ находится в микробюретке — водород или газовая смесь. Для этого монохроматор УМ-2 был переоборудован в спектроскоп постоянного отклонения. Полученное в монохроматоре изображение спектра поглощения собранной газовой пробы с окуляра напрямую фиксировалось на матрицу цифровой фотокамеры с разрешением 7,5 MPx. Наиболее типичное из полученных изображений представлено на рис. 7.

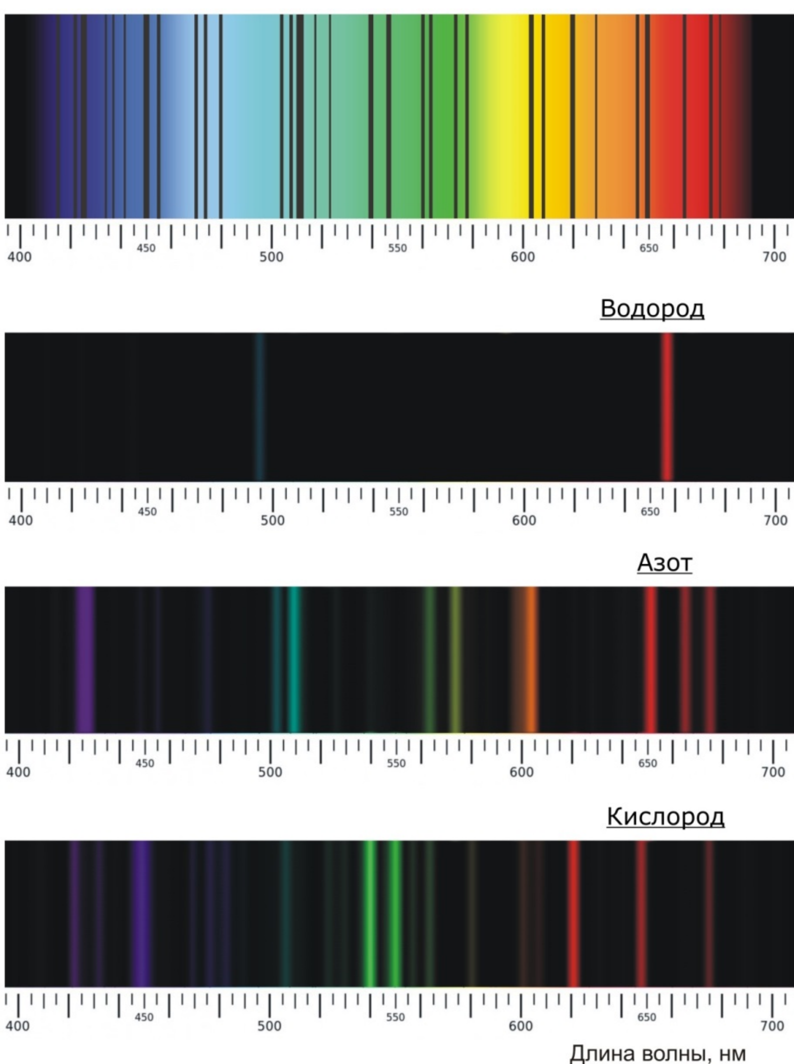


Рис. 7. Наиболее типичный спектр поглощения газовой пробы, полученной с образцов стали 20Х13 после стендовых испытаний на каплеударную эрозию (вверху) и спектры излучения некоторых элементов[1]

Fig. 7. Most typical gas test absorption spectrum obtained from samples of 20X13steel after bench testing on droplet impingement erosion (top), and emission spectra of some elements

Очевидно, что исследованные газовые пробы, имеющие спектр поглощения, приведенный на рис. 7, не могут быть чистым водородом, а представляют собой газовую смесь сложного состава. Сравнение спектров элементов, при-

[1]Изображения на рис. 7 получены в монохроматоре, который позволяет наблюдать только часть спектра, поэтому представленные изображение являются составными и выведены на *линейную шкалу* длин волн (игла-указатель на рисунке не показана).

веденных на рис. 7, показывает, что в газовой пробе присутствуют практически все линии высокой интенсивности азота и кислорода, а водородных линий поглощения в полученном спектре не обнаружено. Кроме того, исследованный газовый спектр содержит линии, не принадлежащие элементам, для сравнения показанным на рис. 7. Среди таких линий можно идентифицировать следующие. Наиболее широкая зона поглощения, имеющая длину волны 511 нм, так же, как и линии 523 и 578 нм, принадлежат парам воды [13, 14]. Характерный триплет 434–436–442 нм, так же, как и линии 415 и 470 нм, принадлежат аргону [11], который при небольших концентрациях в газовых смесях наиболее надежно идентифицируется в низковолновой (фиолетовой) области видимого спектра.

Таким образом, выполненный качественный спектральный анализ подтверждает результаты расчетов, из которых следует, что при рассматриваемых скоростях соударений водяных капель с поверхностью металлических образцов-мишеней не происходит диссоциация молекул воды с выделением чистого водорода. Полученные спектры поглощения не позволяют провести количественную оценку составляющих газовой смеси, однако ее качественный состав дает основания утверждать, что это обычный атмосферный воздух, насыщенный водяными парами. На это указывает доминирование в полученном спектре линий азота и кислорода, а также наличие небольших концентраций аргона. Возможно, среди линий, присутствующих в спектре газовой пробы и не принадлежащих указанным элементам, имеются линии углекислого газа (который всегда содержится в малых дозах в атмосферном воздухе). Однако надежно идентифицировать их с CO_2 при использованном методе качественного спектрального анализа не удается.

Дополнительно к проведенным исследованиям образцы газовой пробы были исследованы методом инфракрасной (ИК) спектрометрии. Целью ИК-исследования было подтверждение и уточнение результатов, полученных с помощью монохроматора УМ-2. Уточнение касалось присутствия в составе полученных газовых проб углекислого газа и паров воды. Исследование проводилось на ИК-спектрометре *IRAffinity*-1*S* и носило качественный характер. В приборе использованы:

— герметизированный интерферометр Майкельсона с автоматическим осушением,
— однолучевая оптическая система,
— высокотемпературный керамический источник ИК-излучения,
— детектор *DLATGS* и программное обеспечением *LabSolutions IR*.

Для исследования газов в ИК-спектрометре *IRAffinity*-1*S* используется специальная газовая кювета с фиксированной длиной оптического пути (5 см).

Инфракрасное тепловое излучение ослабляется при прохождении через газовую атмосферу вследствие поглощения и рассеяния молекулами газа. Хорошо известно [15, 16], что молекулы воды и углекислого газа, находясь в составе атмосферы, поглощают инфракрасное излучение в широких полосах волнового диапазона. Причем эти полосы находятся в различных волновых областях, что позволяет идентифицировать в атмосферной газовой смеси наличие H_2O и CO_2 по спектру пропускания — зависимости коэффициента пропускания T от длины волны λ или частоты ν (волнового числа) излучения.

На рис. 8 приведены спектры пропускания некоторых составляющих земной атмосферы. Наиболее широкая полоса пропускания с центром в $\lambda = 6{,}3$ мкм у водяного пара (рис. 8, *в*). Углекислый газ имеет значительно более узкую полосу пропускания с центром в $\lambda = 2{,}7$ мкм (рис. 8, *б*). Эти полосы сохраняют свое положение, когда H_2O и CO_2 входят в состав газовой смеси (рис. 8, *г*), что и позволяет выявлять их присутствие в атмосфере.

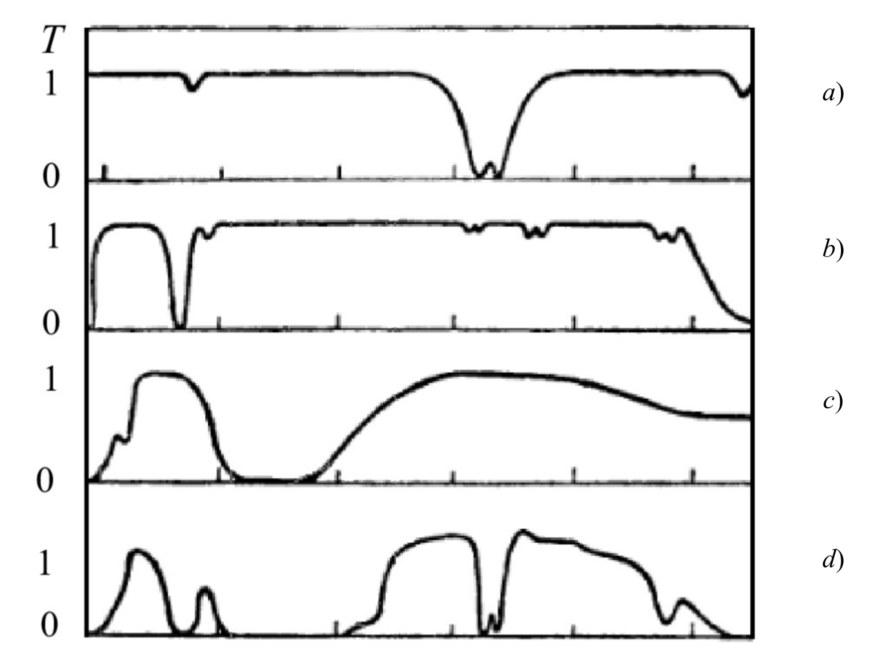


Рис. 8. Спектральное пропускание озона (*a*), углекислого газа (*b*), водяных паров (*c*) и земной атмосферы (*d*) [16]

Fig. 8. Spectral transmission of ozone (*a*), carbon dioxide (*b*), water steam (*c*), and earth atmosphere (*d*) [16]

На рис. 9 представлен спектр пропускания исследуемой газовой смеси с металлических образцов после эрозионных стендовых испытаний. Данные получены с помощью ИК-спектрометра *IRAffinity*-1*S*. На спектрограмме четко видны полосы пропускания с центрами в приведенных выше значениях длин волн (2700 и 6300 нм), что свидетельствует о наличии в газовой смеси углекислого газа и водяных паров.

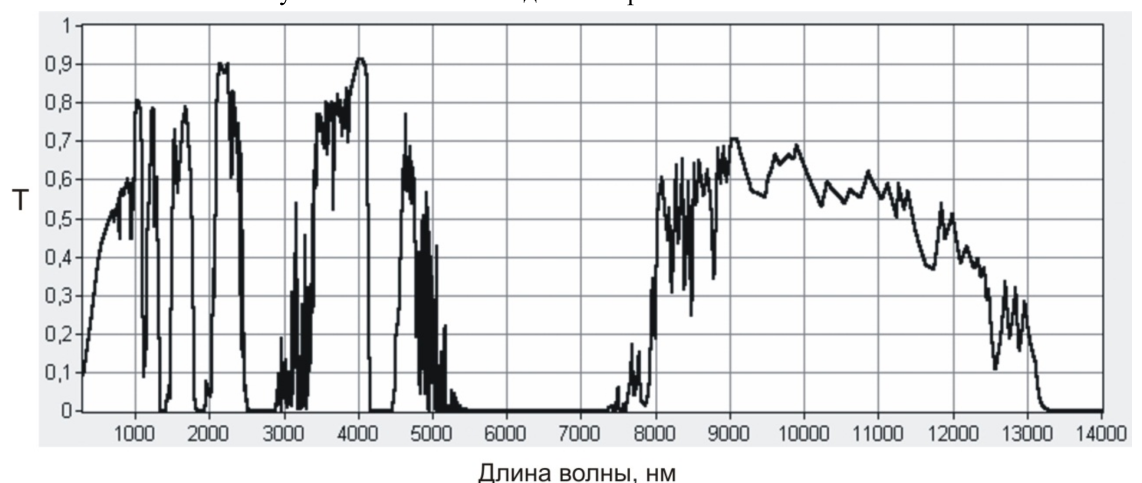


Рис. 9. Спектр пропускания газовой смеси, полученной с образцов стали 20Х13 после стендовых испытаний на каплеударную эрозию

Fig. 9. Transmission spectrum of gas mixture obtained from samples of 20X13 steel after droplet impingement erosion bench testing

В целом же общий вид спектра пропускания на рис. 9 типичен для влажной атмосферы.

Таким образом, анализ состава газа в пузырьковых треках, выполненный с помощью монохроматора УМ-2 и инфракрасного спектрометра *IRAffinity*-1*S*, дает идентичные результаты. Газ, выделяющийся в глицерине из образцов после стендовых испытаний на каплеударную эрозию (рис. 1), является атмосферным воздухом с повышенным содержанием водяного пара.

Заключение. Гипотеза о диссоциации молекул воды при высокоскоростном капельном соударении с образованием атомарного или ионизированного водорода в проведенных исследованиях не нашла ни аналитического (расчетного), ни экспериментального (спектрометрического) подтверждения. Учитывая полученный результат, появление пузырьковых треков при погружении в глицерин образцов, снятых с испытательного эрозионного стенда, можно объяснить следующим образом. Микропузырьки воздуха кавитационного происхождения остаются в весьма разветвленном рельефе поверхностей эрозионной канавки после стендовых испытаний, особенно в эрозионных свищевых каналах. Их характерной особенностью является насыщение воздуха водяным паром в процессе гидродинамической кавитации при соударении капли с металлической поверхностью. При погружении образца в глицерин происходит отрыв пузырьков от стенок металла, слияние, укрупнение и всплытие.

Полученный результат имеет важное значение для понимания физической природы каплеударной эрозии и предотвращения эрозионного износа изделий. Данные проведенных исследований позволяют упростить модель эрозионного разрушения и методику прогнозирования антиэрозионных материалов, исключив из рассмотрения водородную составляющую. Таким образом, износ при каплеударной эрозии имеет кавитационно-механический характер и может быть описан на базе усталостной модели [17–19].

Библиографический список

1. Varavka, V. N. Multilayered Nanocomposite Coatings for Anti-Erosive Protection. Chapter 5 / V. N. Varavka, O. V. Kudryakov, A. V. Ryzhenkov // Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications / ed. I. A. Parinov. — New-York : Nova Science Publishers, 2015. — P. 105–132.

2. Моделирование усталостной компоненты процесса деградации металлической поверхности в условиях воздействия двухфазного потока / В. Н. Варавка [и др.] // Интегрированные виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях : сб. тр. Междунар. науч. симпоз. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2015. — С. 325–330.

3. Особенности процессов деградации поверхности металлических материалов при жидкокапельном ударном воздействии / О. В. Кудряков [и др.] // Материалы и технологии XXI века : сб. статей XIV Междунар. науч.-техн. конф. — Пенза : Приволжский Дом знаний, 2016. — С. 27–31.

4. Матюшенко, В. Я. Износостойкость наводороженных металлов / В. Я. Матюшенко // Исследование водородного износа. — Москва : Наука, 1977. — С. 24–27.

5. Маргулис, М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) / М. А. Маргулис. — Москва : Высшая школа, 1984. — 272 с.

6. Завилопуло, А. Н. Ионизация молекул азота, кислорода, воды и двуокиси углерода электронным ударом вблизи порога / А. Н. Завилопуло, Ф. Ф. Чипеев, О. Б. Шпеник // Журнал технической физики. — 2005. — Т. 50, вып. 4. — С. 402–407.

7. Международная база данных атомных и молекулярных констант NIST [Электронный ресурс] / U. S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America ; NIST Standard Reference Database. — Режим доступа: http://www.webbook.nist.gov (дата обращения: 15.01.16).

8. Чижов, А. В. Численное исследование высокоскоростного взаимодействия капли жидкости с преградой : автореф. дис ... канд. тех. наук / А. В. Чижов. — Санкт-Петербург : СПбГТУ, 1998. — 18 с.

9. Чижов, А. В. Высокоскоростной удар капли о преграду / А. В. Чижов, А. А. Шмидт // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, вып. 12. — С. 18–26.

10. Computational study of High-speed liquid droplet impact / K. K. Haller [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2002. — Vol. 92, № 5. — P. 2821–2828.

11. Физические величины. Справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — Москва : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

12. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей. Справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд / пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. — Ленинград : Химия, 1982. — 592 с.

13. Сущинский, М. М. Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов / М. М. Сущинский. — Москва : Наука, 1969. — 300 с.

14. Демтредер, В. Лазерная спектроскопия: основные принципы и техника эксперимента / В. Демтредер ; пер. с англ. под ред. И. И. Собельмана. — Москва : Наука, 1985. — 608 с.

15. Бёккер, Ю. Спектроскопия / Ю. Бёккер ; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой ; под ред. А. А. Пупышева, М. В. Поляковой. — Москва : Техносфера, 2009. — 528 с.

16. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение / А. Смит ; пер. с англ. Б. Н. Тарасевича ; под ред. А. А. Мальцева. — Москва : Мир, 1982. — 328 с.

17. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 1. Начальная стадия каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 1. — С. 89–99.

18. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 2. Стадия развитой каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 2. — С. 201–212.

19. Кудряков, О. В. Механизмы и закономерности деградации поверхности стали на стадиях развитой каплеударной эрозии / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2015. — № 2. — С. 100–112.

References

1. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V., Ryzhenkov, A.V. Multilayered Nanocomposite Coatings for Anti-Erosive Protection. Chapter 5. Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications. I.A. Parinov, ed. New-York: Nova Science Publishers, 2015, pp. 105–132.

2. Varavka, V.N., et al. Modelirovanie ustalostnoy komponenty protsessa degradatsii metallicheskoy poverkhnosti v usloviyakh vozdeystviya dvukhfaznogo potoka. [Modeling of fatigue component of metal surface degradation process under conditions of two-phase flow.] Integrirovannye vibrovolnovye tekhnologii v mashinostroenii, metalloobrabotke i drugikh otraslyakh: sb. tr. Mezhdunar. nauch. simpoz. [Integrated vibro-wave technologies in machine building, metalworking and other industries: Proc. Int. Acad. Symposium.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2015, pp. 325–330 (in Russian).

3. Kudryakov, O.V., et al. Osobennosti protsessov degradatsii poverkhnosti metallicheskikh materialov pri zhidkokapel'nom udarnom vozdeystvii. [Features of surface degradation of metallic material surfaces under liquid droplet impact.] Materialy i tekhnologii XXI veka: sb. statey KhIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Materials and technologies of the XXI century: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.] Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2016, pp. 27–31 (in Russian).

4. Matyushenko, V.Ya. Iznosostoykost' navodorozhennykh metallov. [Wear resistance of hydrogen-charged metals.] Issledovanie vodorodnogo iznosa. [Investigation of hydrogen wear.] Moscow: Nauka, 1977, pp. 24–27 (in Russian).

5. Margulis, M.A. Osnovy zvukokhimii (khimicheskie reaktsii v akusticheskikh polyakh). [Fundamentals of sound chemistry (chemical reactions in acoustic fields).] Moscow: Vysshaya shkola, 1984, 272 p. (in Russian).

6. Zavilopulo, A.N., Chipev, F.F., Shpenik, O.B. Ionizatsiya molekul azota, kisloroda, vody i dvuokisi ugleroda elektronnym udarom vblizi poroga. [Ionization of nitrogen, oxygen, water, and carbon dioxide molecules by near-threshold electron impact.] Technical Physics, 2005, vol. 50, iss. 4, pp. 402-407 (in Russian).

7. Mezhdunarodnaya baza dannykh atomnykh i molekulyarnykh konstant NIST. [NIST International database of atomic and molecular constants.] U. S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America; NIST Standard Reference Database. Available at: http://www.webbook.nist.gov (accessed: 15.01.16) (in Russian).

8. Chizhov, A.V. Chislennoe issledovanie vysokoskorostnogo vzaimodeystviya kapli zhidkosti s pregradoy : avtoref. dis ... kand. tekh. nauk. [Numerical investigation of high-speed of liquid drop – obstacle interaction: Cand.Sci. (Eng.) diss., author’s abstract.] St. Petersburg: SPbGTU, 1998, 18 p. (in Russian).

9. Chizhov, A.V., Schmidt, A.A. Vysokoskorostnoy udar kapli o pregradu. [Impact of a high-velocity drop on an obstacle.] Technical Physics, 2000, vol. 45, iss. 12, pp. 1529-1537 (in Russian).

10. Haller, K.K., et al. Computational study of high-speed liquid droplet impact. Journal of Applied Physics, 2002, vol. 92, no. 5, pp. 2821–2828.

11. Grigoryev, I.S., Meylikhov, E.Z., eds. Fizicheskie velichiny. Spravochnik. [Physical Quantities. Reference book.] Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).

12. Rid, R., J.M. Prausnitz, Sherwood, T. Svoystva gazov i zhidkostey. Spravochnoe posobie. [The properties of gases and liquids. Handbook.] Sokolov, B.I., ed. Trans. from Engl. Leningrad: Khimiya, 1982, 592 p. (in Russian).

13. Sushchinskiy, M.M. Spektry kombinatsionnogo rasseyaniya molekul i kristallov. [Spectra of Raman scattering of molecules and crystals.]. Moscow: Nauka, 1969, 300 p. (in Russian).

14. Demtroder, W. Lazernaya spektroskopiya: osnovnye printsipy i tekhnika eksperimenta. [Laser spectroscopy: basic principles and experimental technique.] Sobelman, I.I., ed., Trans. from Engl. Moscow: Nauka, 1985, 608 p. (in Russian).

15. Becker, J. Spektroskopiya. [Spectroscopy.] Kazantseva, L.N., Trans. from German; Pupysheva, A.A., Polyakova, M.V., eds. Moscow: Tekhnosfera, 2009, 528 p. (in Russian).

16. Smith, A. Prikladnaya IK-spektroskopiya: osnovy, tekhnika, analiticheskoe primenenie. [Applied IR-spectroscopy: basics, technique, and analytical application.] Tarasevich, B.N., Trans. from Engl.; Maltsev, A.A., ed. Moscow: Mir, 1982, 328 p. (in Russian).

17. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 1. Nachal'naya stadiya kapleudarnoy erozii. [Regularities of steel wear under the impact of discreet water-droplet stream. Part I: Initial stage of droplet-impingement erosion.] Journal of Friction and Wear, 2015. — vol. 36, iss. 1, pp. 71–79 (in Russian).

18. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 2. Stadiya razvitoy kapleudarnoy erozii. [Regularities of steel wear under the impact of discreet water-droplet stream. Part II: Stage of the developed droplet-impingement erosion.] Journal of Friction and Wear, 2015, vol. 36, iss. 2, pp. 153-162 (in Russian).

19. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy i zakonomernosti degradatsii poverkhnosti stali na stadiyakh razvitoy kapleudarnoy erozii. [Mechanisms and laws of steel surface degradation during the stages of developed droplet erosion.] J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2015, vol. 9, iss. 1, pp. 203–214 (in Russian).

Поступила в редакцию 07.02.2017
Сдана в редакцию 07.02.201
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 07.02.2017
Submitted 07.02.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Кудряков Олег Вячеславович
профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение», главный научный сотрудник НОЦ «Материалы» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1462-4389

Authors:

Kudryakov, Oleg V.
Senior Research Scholar of REC “Materials”, professor of the Material Physics and Applied Hylology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1462-4389
kudryakov@mail.ru

kudryakov@mail.ru

Варавка Валерий Николаевич,
профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение», руководитель НОЦ «Материалы» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент,
ORCID : http://orcid.org/0000-0003-4703-7372
varavkavn@gmail.com

Varavka, Valery N.,
Head of REC "Materials", professor of the Material Physics and Applied Hylology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID : http://orcid.org/0000-0003-4703-7372
varavkavn@gmail.com

Ирха Владимир Александрович,
старший преподаватель кафедры физики Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (РФ, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-6474-8240
v-irx@rambler.ru

Irkha, Vladimir A.,
senior lecturer of the Physics Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), (RF, 346428, Rostov Region, Novocherkassk, Prosveshcheniya St., 132),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-6474-8240
v-irx@rambler.ru

Моисеева Ирина Викторовна,
соискатель кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-7286-157X
irisena@mail.ru

Moiseeva, Irina V.,
applicant from the Material Physics and Applied Hylology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-7286-157X
irisena@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-50 10.23947/1992-5980-2017-17-2-70-78

Нечеткая система управления состоянием многооперационного станка*

А. К. Тугенгольд[1], А. И. Изюмов[2], Р. Н. Волошин[3], М. Ю. Соломыкин[4]**
[1, 2, 3, 4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Fuzzy control system of multioperational machine status ***

A. K. Tugengold[1], A. I. Izyumov[2], R. N. Voloshin[3], M. Y. Solomykin[4]**
[1, 2, 3, 4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье представлены основные аспекты построения системы управления состоянием многооперационных станков с программным управлением на базе информационно-управляющего модуля *e-Mind Machine* и аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Показано, что входные воздействия системы управления формируются за счет множеств наследуемых и оперативных составляющих параметров состояний. Целью работы является построение системы контроля состояния, выявление размерного износа и определение периода стойкости инструмента на основе методов нечеткой логики.
Материалы и методы. Предложен новый алгоритм построения экспертной системы на основе методов нечеткой логики. Показана применимость нейронечетких методов для решения задач определения срока службы инструмента путем сравнения расчетных значений с данными фирм-производителей. Исследование основывается на применении концепции электронного обслуживания с использованием экспертных систем.
Результаты исследования. Обоснованы основные принципы построения и использования системы мониторинга, обеспечивающей возможность при управлении адаптироваться к складывающейся ситуации и прогнозировать изменения состояний в процессе обработки деталей. В функции мониторинга включена не только обработка данных, полученных от диагностических устройств мехатронной системы и внешнего оборудования, но и прогнозирование остаточной размерной стойкости инструмента, прогнозирование стойкости по периоду нормального износа. Процесс принятия решений по управлению состоянием инструмента представлен в виде алгоритма работы экспертной системы на основе использования нейронечеткого контроллера.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть применены в производстве деталей, где точность является важным параметром. Использование автоматизированных систем контроля состояния станка сокращает затраты из-за простоя оборудования, а контроль за состоянием инструмента позволяет снизить процент брака. Показаны характерные примеры принятия решений в нейронечеткой системе.

Introduction. The paper presents the key aspects of constructing a management system for the state of multi-operation computer-controlled machines based on the information-control module of *e-Mind Machine* and the apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic. It is shown that the input effects of the control system are formed due to the sets of inheriting and operating components of the status parameters. The work objective is to develop a system for monitoring the condition, detecting dimensional wear, and determining the period of tool life on the basis of the fuzzy logic methods.
Materials and Methods. A new algorithm for constructing an expert system based on the fuzzy logic methods is proposed. The applicability of fuzzy neuron methods for solving the problems on determining the service life of the instrument through comparing the calculated values to the data of the manufacturing firms is demonstrated. The study is based on the application of the concept of electronic services using expert systems.
Research Results. The basic principles of the construction and application of the status monitoring system are substantiated. They provide the possibility, under managing, to adapt to the emerging situation and to predict state changes when processing the parts. The monitoring functions include not only the processing of data obtained from the test units of the mechatronic system and external equipment, but both the forecasting of the residual dimensional tool life and the durability for the period of normal wear and tear. The decision-making process on managing the tool status is presented in the form of an algorithm for the expert system activity based on the use of a fuzzy neuron controller.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be applied in the parts production where accuracy is one of the key parameters. Automated control systems for the machine condition allow reducing costs due to equipment downtime, and monitoring the tool status can reduce the rejection rate. The characteristic examples of decision-making in the fuzzy neuron system are given.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail:akt0@yandex.ru, andrey-igorevich1991@yandex.ru, r.voloshin2909@gmail.com, oblivion_rk@mail.ru
***The research is done within the frame of independent R&D.

Ключевые слова: нечеткое управление, нейронечеткий контроллер, мониторинг, экспертная система управления состоянием станка.

Keywords: fuzzy control, fuzzy neuron controller, monitoring, expert control system of machine status.

Введение. В современном компьютеризированном машиностроительном производстве широко используются многооперационные станки (МС), длительное время работающие без участия оператора. При автоматическом функционировании технологических машин вопросы эффективного поддержания их высокой надежности приобретают особую важность. Теряет актуальность стратегия реагирования на технологические нарушения, низкую точность обработки, поломки инструментов, агрегатов и узлов МС в целом. Новым задачам производства в большей степени отвечают программы автоматизированного мониторинга и управления.

Под мониторингом технического состояния подразумевается процесс, обеспечивающий возможность определения текущей эксплуатационной готовности объекта исследования и автоматического принятия оперативных и тактических решений [1–8].

Так, в функции системы мониторинга инструмента входят сбор, хранение и анализ явных или косвенных параметров инструмента на станке. Данная информация позволяет судить о состоянии инструмента и изменениях, происходящих в процессе обработки. Полученные оценки состояния служат основой для принятия решений по управлению функциями дальнейшего использования инструмента или его замены.

Очевидно, что промышленное применение систем управления состоянием предполагает их эффективную работу в различных условиях. Обоснование и создание таких систем остается одной из главных проблем современного машиностроения [9]. Подход, предложенный в работах [9, 10], базируется на следующем представлении: для информационной и интеллектуальной поддержки управления процессами при обработке деталей МС наделяются системой знаний (СЗ) о своих особенностях, процессах обработки, состоянии инструментального обеспечения и пр. Таким образом, для каждой единицы технологического оборудования предусматривается создание информационно-управляющего модуля «умной машины» — *e-Mind Machine* в составе УЧПУ станка или в числе поддерживающих сервисов. Реализация такого подхода стала важным этапом на пути формирования единой среды эксплуатации, программирования и технического обслуживания станков (в том числе многооперационных) и другого технологического оборудования.

В частности, система управления состоянием инструментов МС должна учитывать следующие факторы:
— изнашиваемость инструмента,
— размерный износ,
— остаточная стойкость,
— вибрации и пр.

Мониторинг состояния режущего инструмента является важной и сложной задачей по нескольким причинам. Во-первых, процессы обработки имеют нелинейный характер, а параметры системы могут непрерывно изменяться во времени, что существенно затрудняет оценку состояний. Во-вторых, полученные от датчиков сигналы зависят от множества факторов, таких как условия обработки, геометрия режущих инструментов, материал заготовки и т. д. Применение прямых методов контроля состояния инструмента не представляется возможным, следовательно, необходимы косвенные измерения для оценки износа. Кроме того, сигналы, поступающие от датчиков станка, могут искажаться по многими другим причинам, таким как нагрев инструмента, вибрации, геометрические отклонения инструмента, индивидуальные свойства материала заготовки, зашумленность сигнала аналогово-цифрового преобразования и пр. Этим обусловлена нечеткость знаний о стойкости и состоянии инструментов, находящихся на станке в процессе обработки детали.

Задача управления состоянием. При реализации задач формализации оценки и управления состоянием элементов и устройств в процессе функционирования МС использование традиционного математического аппарата ограничено. Во многих случаях приходится оперировать качественными характеристиками процессов. Невозможно получить точную, достоверную информацию о процессах, поэтому целесообразно использовать аппарат неточных знаний, которые не могут быть интерпретированы как полностью истинные или ложные. Для решения задач, связанных с размытостью и неточностью Л. Заде [11, 12] предложил формальный аппарат нечетких множеств и нечеткой логики. Соответствующие представления нечетких множеств использованы при решении задач оценки и управления состоянием МС:

$$Y = R\,(X),$$

где $\boldsymbol{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ — множество входных состояний переменных процесса; $\boldsymbol{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$ — множество значений параметров управления; R — нечеткий оператор преобразований в системе управления состоянием.

Основные аспекты представляемой методики управления состоянием МС покажем на примере инструментального обеспечения. Решим задачу управления состоянием i-го инструмента, используемого на некотором p-*м* про-

ходе в операции обработки детали. Множество входных переменных X_i, отображающих в системе знаний состояние i-го инструмента, можно представить в виде:

$$X_i = \{X_{iн}, X_{iо}\},$$

где $X_{iн}$ — множество наследуемых параметров i-го инструмента, соответствующих его состоянию к моменту начала выполнения перехода p при обработке; X_{io} — множество оперативных параметров i-го инструмента, соответствующих его состоянию онлайн в процессе выполнения перехода p.

Во множество $X_{iн}$ включены перечисленные ниже значения.

1. Время T_i, путь резания L_i, обработанная площадь поверхностей A_i, объем Q_i снимаемого материала с заготовки i-м инструментом по переходам операции в процессе обработки детали до рассматриваемого перехода p.

2. Допустимые значения размерного износа инструмента при выполнении перехода p обработки детали, ограниченной допуском по размерной точности поверхности.

3. Действительная скорость (интенсивность) изнашивания инструмента и величина размерного износа.

4. Оценки нечеткой границы размерного износа FBS_i, нечеткой границы износа FB_i по времени [9].

5. Нечеткие представления о состоянии инструмента по соотношению параметров п. 1 с периодом стойкости i-го инструмента и FB_i — нечеткой границы стойкости, т. е. достаточность ресурса инструмента для выполнения следующего технологического перехода. Так, например, время остаточной стойкости инструмента T_{ji} к моменту начала резания на p-м переходе использования i-го инструмента определяется зависимостью

$$T_{ji} = T_{FBi} - \sum_{j=1}^{n-1} t_{ji},$$

где T_{FBi} — период времени до наступления нечеткой границы стойкости; t_{ji} — время резания инструментом при выполненных j предшествующих технологических переходах.

Во множество X_{io} входят данные, получаемые от системы диагностирования непосредственно при обработке оценки стойкости инструмента, состояния и изменениях в процессе обработки.

Система мониторинга состояния. В функции системы мониторинга инструмента входят выявление, сбор, хранение, оценка, анализ и прогнозирование явных или косвенных параметров описания инструмента, находящегося на станке. Полученные таким образом данные позволяют сделать выводы о стойкости инструмента, интенсивности его изнашивания, о состоянии и изменениях в процессе обработки. Для получения входной информации в процессе работы станка применяются различные диагностические устройства — датчики: силы резания; крутящего момента; тока двигателя; эффективной мощности; вибраций; акустической эмиссии; мощности звукового давления; перемещений пр. Сигналы, получаемые от датчиков, лишь косвенно характеризуют состояние инструмента. Поэтому система мониторинга использует методы обработки результатов наблюдений для вывода заключений о состоянии инструмента, в том числе преобразования получаемой от датчиков информации, ее фильтрации. Эти данные используются и для обучения системы [13, 14]. Это особенно важно при использовании инструмента в пределах пограничных полос *WFB* (*width of the fuzzy boundary*) и стойкости *WFBP* (*width of the fuzzy boundary of perseverance*).

В число функций, выполняемых узлом мониторинга, входят следующие.

1. Принимаются решения об использовании для диагностирования i-го инструмента устройств МС и внешних устройств.

2. Для выполнения функций подаются команды на модуль управления диагностическими устройствами.

3. Обрабатываются данные, полученные от диагностических устройств МС и внешнего оборудования.

4. Выполняется мониторинг состояния инструмента.

5. Прогнозируется остаточная размерная стойкость до *FBS* (*fuzzy boundary of the tool wear size*).

6. Прогнозируется остаточная стойкость по периоду нормального износа до *FB* (*fuzzy boundary of the tool life*).

Для выполнения перечисленных задач предусмотрено управление диагностическими устройствами, основной функционал которого представлен ниже.

1. Выбор стратегии и тактики диагностирования при использовании возможностей прямых и (или) косвенных измерений устройствами станка и (или) внешним диагностическим оборудованием.

2. Принятие решений по управлению измерительными устройствами станка, регулирование контролирующих алгоритмов, формирование команд управления.

3. Выработка решений по управлению внешним диагностическим оборудованием, формирование команд управления.

4. Информационная связь с узлами блока ИНСТРУМЕНТ, связь с УЧПУ.

Полученные системой мониторинга оценки состояния и периода стойкости служат основой для принятия экспертной системой (ЭС) решений по управлению функциями его использования или замены.

На стадии, близкой к риску дальнейшей работы инструмента, узел адаптации и специальных режимов резания в ЭС выполняет изменение режимов резания при состояниях, определяемых границами стойкости *FB* или *FBS*. Основные функции блока перечислены ниже.

1. Оценка периода использования *i*-го инструмента относительно «границы стойкости». Функция реализуется при выполнении прохода обработки детали.

2. Принятие решения по адаптации режимов резания (скорости V и (или) подачи S). Функция реализуется при работе *i*-го инструмента для бесперебойного выполнения прохода на детали, находящейся в процессе обработки на станке (т. е. без остановки процесса обработки, связанной с заменой инструмента).

3. Корректировка программы ЧПУ станка.

Для изменения, например, скорости резания $V(T)$ в зависимости от желаемого периода стойкости T можно воспользоваться материалами производителей режущего инструмента, например компании *Sandvik Coromant* [15]:

$$V(T) = V_a\, k_r(T),$$

где V_a — табличное значение скорости резания, $k_r(T)$ — коэффициент коррекции, принимаемые по рекомендациям фирмы.

Экспертная система управления состоянием. Решение проблемы построения и функционирования ЭС управления состоянием элементов и узлов станка представлено в работе [10]. Для принятия решений по управлению состоянием инструмента в процессе обработки предлагается ЭС инструментального обеспечения, построенная на базе нейронечеткого контроллера (ННК). Структурная схема такой ЭС содержит основные блоки, представленные в [14].

Множество значений параметров управления формируется ЭС на базе перечисленных ниже прогнозируемых решений по управлению функциями использования или замены инструмента.

1. Продолжать обработку *i*-м инструментом без изменения программы УЧПУ.

2. Изменить режимы обработки с помощью узла адаптации и специальных режимов резания при переходе к работе в пограничных полосах *WFBS* и *WFB* [9].

3. Оперативно сменить инструмент во избежание поломки и брака обрабатываемой детали.

Структурная обобщенная схема управления состоянием системы МС представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура системы управления состоянием инструмента

Fig. 1. Structure of the tool status control system

Итак, схема демонстрирует управление состоянием инструмента при *p*-м проходе обработки поверхности заготовки. При этом из устройства числового программного управления (УЧПУ) в базу данных (БД) поступают сведения об *i*-м инструменте, используемом на данном проходе, о технологических режимах и пр.

В БД могут также потребоваться сведения о возможных изменениях режимов обработки, начальном состоянии геометрических параметров инструмента или иные данные от службы технолога и оператора, обслуживающих МС.

Из БД сведения поступают в экспертную систему, в базе знаний (БЗ) которой с учетом имеющихся данных определяются отклонения параметров режущей части инструмента, интенсивность его изнашивания, время обработки поверхности, временные параметры нечеткой пограничной полосы *FBS* и т. д. ЭС выводит решение о целесообразности проведения онлайн-контроля состояния инструмента. При этом запускаются устройства диагностики для оценки состояния в процессе обработки. Создание базы знаний экспертной системы требует формализации нечетких знаний предметной области [16]. Данные, поступающие от ЭС и системы диагностики, используются нейронечетким контроллером при принятии решений по управлению состоянием инструмента на основе учета его прогнозируемой стойкости. ННК реализован на базе модели типа Сугэно в программном пакете *MatLab* с расширением *Fuzzy Logic Toolbox*.

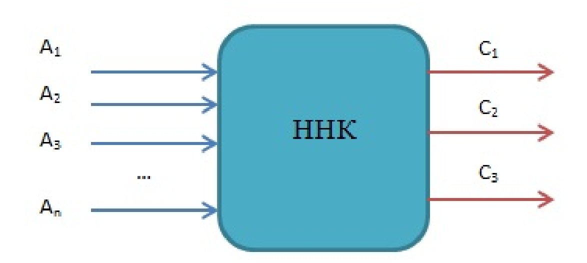


Рис. 2. Схема нейронечеткого контроллера

Fig. 2. Scheme of fuzzy neuron controller

Правила принятия решений формируются в соответствии со спецификой решаемой задачи при использовании соответствующего набора антецедентов и консеквентов. В состав антецедентов A_1–A_n при управлении состоянием *i*-го инструмента (см. рис. 2) включаются, например:

— относительная продолжительность работы инструмента *i*;
— интенсивность изнашивания;
— онлайн-оценка состояния инструмента *i*;
— состояние инструмента относительно нечеткой пограничной полосы;
— запас времени стойкости относительно продолжительности технологического перехода *p* (при программных режимах резания).

Состав консеквентов:

C_1 — продолжение процесса обработки без изменения режимов,
C_2 — продолжение обработки с коррекцией режимов резания,
C_3 — смена инструмента.

Алгоритм работы экспертной системы управления состоянием инструмента представлен на рис. 3.

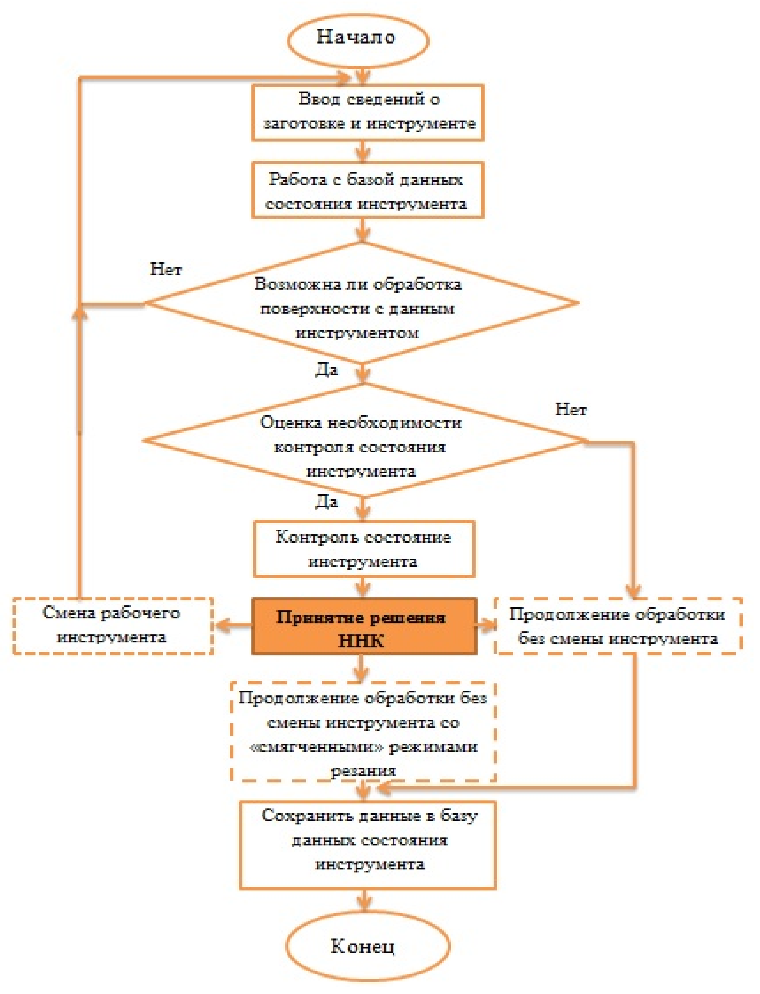


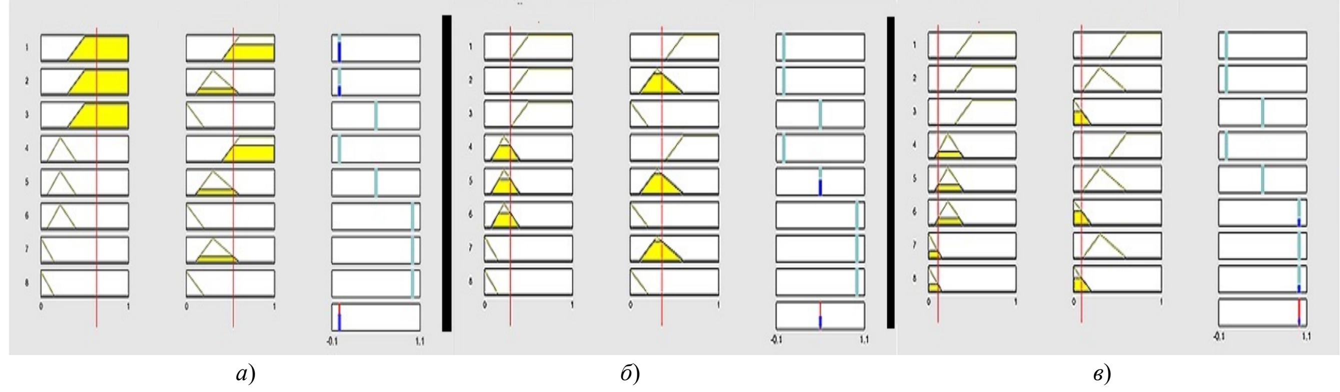
Рис. 3. Алгоритм работы ЭС управления состоянием инструмента

Fig. 3. Algorithm of expert control system operation of tool status

После ввода индекса детали (и поверхности обработки) и индекса инструмента, предназначенного для обработки поверхности, формируется система знаний «состояние инструмента». В данную систему включаются оценки интенсивности изнашивания инструмента; параметры нечеткой пограничной полосы; время, требуемое для обработки поверхности, и пр.

Далее ННК принимается решение и передаются команды, исполняемые посредством УЧПУ (в частности, корректировка кадров программы обработки и выполнение обработки до конца перехода). Возможны действия, связанные с контролем состояния обработанной поверхности, контролем состояния инструмента, а также протоколирование работы станочной системы с учетом накопленного опыта.

Пример иллюстрации фрагментов нейронечеткой модели принятия решений по состоянию инструмента в пакете *MatLab* приведен на рис. 4.



а) *б*) *в*)

Рис. 4. Иллюстрация нейронечеткой модели управления

Fig. 4. Illustration of fuzzy neuron control model

В качестве входных переменных антецедентов приняты состояние инструмента относительно пограничной полосы и запас стойкости по отношению к времени окончания обработки поверхности выполняемого технологического перехода (с термами большой, средний и малый). Как показано в алгоритме (см. рис. 2), решениями ННК являются: продолжение процесса обработки без изменений режимов, продолжение обработки с коррекцией режимов резания и смена инструмента.

Графическое представление правил принятия решений демонстрирует прогнозы по трем характерным ситуациям (см. рис. 4):

а) при состоянии стойкости инструмента до пределов нечеткой пограничной полосы (≈0,6) и относительно большом запасе стойкости для обработки всей поверхности (≈0,5) ННК принимается решение о продолжении обработки *i*-м инструментом без изменения режимов резания (решение $C_1 = 0$);

б) при состоянии стойкости инструмента до пределов нечеткой пограничной полосы (≈0,3) и среднем запасе стойкости для обработки всей поверхности (≈0,36) ННК принимается решение о продолжении обработки *i*-м инструментом с изменением режимов резания (решение $C_2 = 0,5$);

в) при состоянии стойкости инструмента в пределах нечеткой пограничной полосы (≈0,1) и относительно малом запасе стойкости для обработки всей поверхности (≈0,09) ННК принимается решение о смене инструмента (решение $C_3 = 1$).

Испытания на современных многооперационных станках подтвердили эффективность предложенной системы управления состоянием инструмента.

Заключение. Эффективное современное компьютеризированное машиностроительное производство требует создания единой среды эксплуатации, программирования и технического обслуживания многооперационных станков. Для научного решения данной задачи предложен подход к техническому обслуживанию, предусматривающий применение бортовой интеллектуальной системы управления *e-Mind Machine* для безотказного функционирования станка при максимально эффективной обработке деталей. Немаловажным фактором является также возможность самообслуживания станка, когда часть элементов обслуживания используется станком в автоматическом режиме.

Основное внимание уделено системе управления состоянием инструментов, которое определяется такими характеристиками, как изнашиваемость, остаточная стойкость и пр. Следует отметить, что речь идет об инструментах, находящихся на станке в процессе обработки детали, и получаемые при мониторинге знания об их параметрах характеризуются как нечеткие. Вследствие этого рассматривается нечеткое интеллектуальное управление состоянием инструментального обеспечения МС.

Задача управления состоянием представлена с точки зрения теории нечетких множеств и решается на базе отображения множеств наследуемых и оперативных параметров. Показано как система мониторинга состояния МС и

инструментального обеспечения формирует нечеткие множества оперативных параметров, в том числе заключения о нечетких пограничных полосах стойкости.

Для управления состоянием предложена структура связей ЭС с устройством ЧПУ станка, технологической службой и оператором, обслуживающим станок [17]. Эти связи используются для пополнения или формирования базы данных. Полученные таким образом сведения позволяют:

— оценивать отклонения параметров режущей части инструмента, интенсивности его изнашивания, времени обработки поверхности;

— прогнозировать такие отклонения перед выполнением каждого прохода технологической операции.

Процесс принятия решений по управлению представлен в виде алгоритма работы ЭС с использованием нейронечеткого контроллера. В качестве иллюстрации приведены графические представления правил принятия решений, демонстрирующие характерные ситуации по управлению состоянием инструмента.

Библиографический список

1. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining [Электронный ресурс] / Intelligent Manufacturing Systems. — Режим доступа: http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent-monitoring-system-for-machining/ (дата обращения: 03.12.14.).

2. Čuš, F. Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling / F. Čuš, U. Župerl // Journal of Mechanical Engineering. — 2011. — Vol. 2 (57). — P. 142–150.

3. Григорьев, С. Н. Повышение производительности фрезерования с помощью диагностирования состояния инструмента с учетом достоверности отображения состояния объекта по критерию его отказа / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, Н. Ю. Черкасова // Вестник МГТУ «Станкин». — 2011. — № 3 (15). — С. 44–48.

4. Vallejo, A.-J. On-line Cutting Tool Condition Monitoring in Machining Processes using Artificial Intelligence / A.-J. Vallejo // Robotics, Automation and Control / ed. P. Pecherková, M. Flídr, J. Duník. — Vienna : I-Tech, 2008. — P. 494.

5. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling / E. Bagci // Scientific Research and Essays. — 2011. — Vol. 6 (2). — P. 256–277.

6. Salgado, D.-R. Tool wear detection in turning operations using singular spectrum analysis / D.-R. Salgado, F.-J. Alonso // Journal of Materials Processing Technology. — 2006. — Vol. 171 (3). — P. 451–458.

7. Jemielniak, K. Tool wear monitoring based on a non-monotonic signal feature / K. Jemielniak // Journal of Engineering Manufacture. — 2006. — Vol. 220 (2). — P. 163–170.

8. Принципы построения интеллектуальной электронной документации станка / Г. В. Самодуров [и др.] ; АПСП «Станкоинструмент» // СТИН. — 2012. — № 7. — С. 15–20.

9. Мониторинг и управление состоянием инструмента на многооперационных станках / А. К. Тугенгольд [и др.] // СТИН. — 2016. — № 11. — С. 13–21.

10. Тугенгольд, А. К. Гибкий мониторинг мехатронных технологических машин / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 4. — С. 51–58.

11. Zadeh, L.-A. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts / L.-A. Zadeh // International Journal of Man-Machine Studies. — 1976. — Vol. 8. — P. 249–291.

12. Zadeh, L.-A. Fuzzy sets / L.-A. Zadeh // Information and control. — 1965. — Vol. 8 (3). — P. 338–353.

13. Ni, J. Watchdog — information technology for proactive product maintenance and its implications to ecological product re-use / J. Ni, J. Lee, D. Djurdjanovic // Advanced Engineering Informatics. — 2003. — Vol. 17. — P. 109–125.

14. Тугенгольд, А. К. К вопросу построения нечеткой экспертной системы продукционного типа для технологической регулировки машин / А. К. Тугенгольд, В. П. Димитров, Л. В. Борисова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2008. — Т. 8, № 3 (38). — С. 419–426.

15. Sandvik Coromant. Техническая информация [Электронный ресурс] / Sandvik Coromant. — Режим доступа: http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/pages/default.aspx (дата обращения: 12.02.17).

16. Димитров, В. П. Формализация нечетких экспертных знаний при лингвистическом описании технических систем / В. П. Димитров, Л. В. Борисова. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2011. — 209 с.

17. Оценка нечеткой границы стойкости инструмента многооперационного станка / А. К. Тугенгольд [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 2 (81). — С. 33–41.

References

1. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining Intelligent Manufacturing Systems. Available at: http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent-monitoring-system-for-machining. (accessed: 03.12.14.).

2. Čuš, F., Župerl, U. Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling. Journal of Mechanical Engineering, 2011,vol. 2 (57), pp. 142–150.

3. Grigoryev, S.N., Gurin, V.D., Cherkasova, N.Y. Povyshenie proizvoditel'nosti frezerovaniya s pomoshch'yu diagnostirovaniya sostoyaniya instrumenta s uchetom dostovernosti otobrazheniya sostoyaniya ob"ekta po kriteriyu ego otkaza. [Improving milling efficiency by tool diagnostics with account for the display validity of the object status by its failure criterion.] Vestnik MSTU “STANKIN”, 2011, no. 3 (15), pp. 44–48 (in Russian).

4. Vallejo, A.-J. On-line Cutting Tool Condition Monitoring in Machining Processes using Artificial Intelligence. Robotics, Automation and Control. P. Pecherková, M. Flídr, J. Duník, eds. Vienna: I-Tech, 2008, p. 494.

5. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling. Scientific Research and Essays, 2011, vol. 6 (2), pp. 256–277.

6. Salgado, D.-R., Alonso, F.-J. Tool wear detection in turning operations using singular spectrum analysis. Journal of Materials Processing Technology, 2006, vol. 171 (3), pp. 451–458.

7. Jemielniak, K. Tool wear monitoring based on a non-monotonic signal feature. Journal of Engineering Manufacture, 2006, vol. 220 (2), pp. 163–170.

8. Samodurov, G.V., et al. Printsipy postroeniya intellektual'noy elektronnoy dokumentatsii stanka. [Principles of constructing intelligent electronic machine documentation.] STIN, 2012, no. 7, pp. 15–20 (in Russian).

9. Tugengold, A.K., et al. Monitoring i upravlenie sostoyaniem instrumenta na mnogooperatsionnykh stankakh. [Monitoring and control of the tool status on multi-operation machines.] STIN, 2016, no. 11, pp. 13–21 (in Russian).

10. Tugengold, A.K., Voloshin, R.N. Gibkiy monitoring mekhatronnykh tekhnologicheskikh mashin. [Flexible monitoring of mechatronic technological machines.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 4, pp. 51–58 (in Russian).

11. Zadeh, L.-A. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts. International Journal of Man-Machine Studies, 1976, vol. 8, pp. 249–291.

12. Zadeh, L.-A. Fuzzy sets. Information and control, 1965, vol. 8 (3), pp. 338–353.

13. Ni, J., Djurdjanovic, D. Watchdog — information technology for proactive product maintenance and its implications to ecological product re-use. Advanced Engineering Informatics, 2003, vol. 17, pp. 109–125.

14. Tugengold, A.K., Dimitrov, V.P., Borisova, L.V. K voprosu postroeniya nechetkoy ekspertnoy sistemy produktsionnogo tipa dlya tekhnologicheskoy regulirovki mashin. [To the question of fuzzy expert system constructing production type for technological adjustment of machines.] Vestnik of DSTU, 2008, vol. 8, no. 3 (38), pp. 419–426 (in Russian).

15. Sandvik Coromant. Technology Information. Available at: http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/pages/default.aspx (accessed: 12.02.17).

16. Dimitrov, V.P., Borisova, L.V. Formalizatsiya nechetkikh ekspertnykh znaniy pri lingvisticheskom opisanii tekhnicheskikh system. [Formalization of fuzzy expert knowledge at the linguistic description of technical systems.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2011, 209 p. (in Russian).

17. Tugengold, A.K., et al. Otsenka nechetkoy granitsy stoykosti instrumenta mnogooperatsionnogo stanka. [The estimation of fuzzy boundary of multioperational machine tool life.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, № 2 (81), pp. 33–41 (in Russian).

Поступила в редакцию 26.03.2016
Сдана в редакцию 31.03.2016
Запланирована в номер 30.09.2016

Received 26.03.2016
Submitted 31.03.2016
Scheduled in the issue 30.09.2016

Об авторах:

Тугенгольд Андрей Кириллович,
профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
akt0@yandex.ru

Authors:

Tugengold, Andrey K.,
professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
akt0@yandex.ru

Изюмов Андрей Игоревич,
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9054-448X
Andrei-igorevich1991@yandex.ru

Волошин Роман Николаевич,
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907 B
r.voloshin2909@gmail.com

Соломыкин Михаил Юрьевич,
магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5216-9938
oblivion_rk@mail.ru

Izyumov, Andrey I. ,
postgraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9054-448X
Andrei-igorevich1991@yandex.ru

Voloshin, Roman N.,
postgraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907 B
r.voloshin2909@gmail.com

Solomykin, Mikhail Y.,
undergraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5216-9938
oblivion_rk@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-784.9: 621.91: 674.02 10.23947/1992-5980-2017-17-2-79-87

Формирование силовой последовательности в процессе фрезерной обработки древесины на копировально-фрезерных станках*

А. Н. Чукарин[1], С. В. Голосной[2]**

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Power sequence definition under woodworking milling on contour-milling machines***

A. N. Chukarin[1], S. V. Golosnoy[2]**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Анализ научных работ показывает актуальность данной темы, т. к. не обнаружены публикации, посвященные определению спектральных составляющих силовой последовательности от процесса фрезерования, что затрудняет анализ моделей возбуждения шума и вибрации. Значительную проблему представляет превышение допустимых уровней шума, возникающего из-за высоких частот вращения инструмента. Наиболее высокие частоты вращения отмечены при работе копировально-фрезерных станков. В нормативах режимов резания на обработку древесины задается только амплитуда силового воздействия, что затрудняет определение спектров шума. Данная научная работа посвящена определению параметров силовой последовательности, возникающей при фрезеровании древесины цилиндрическими фрезами.
Материалы и методы. В процессе научных изысканий были использованы методы теории резания, спектрального анализа, статистической обработки. Методы расчета уровней шума и вибрации в значительной степени определяются заданием силового воздействия в функции времени.
Результаты исследования. В результате проведенного исследования определены и уточнены: закономерности формирования сил при фрезеровании; правила распределения сил по проекциям; закономерности изменения величины срезаемого припуска при фрезеровании.
Обсуждение и заключения. Построенная математическая модель динамики процесса фрезерования и разработанное на ее основе программное обеспечение позволяют оценивать уровни звукового давления, создаваемые как режущим инструментом, так и корпусом шпиндельной бабки. Данное звуковое давление фактически определяет превышение уровней шума над предельно допустимыми значениями.

Introduction. The analysis of the research papers shows the relevance of this topic, since there are no publications devoted to the determination of the spectral components of the power sequence of the milling process which makes it difficult to analyze models of the noise and vibration excitation. The noise exposure limits excess due to the high tool speed presents a critical problem. The highest speed is observed when the copy milling machines are operated. In the cutting conditions standards, only the power action amplitude is specified for woodworking which makes it difficult to determine the noise spectra. This study is devoted to determining parameters of the power sequence arising under the circular moulding.
Materials and Methods. Methods of the cutting theory, spectral analysis, and statistical processing are used in the course of this study. Techniques of the noise and vibration levels analysis are largely determined by specifying the power action as a time function.
Research Results. As a result of the conducted research, the mechanism of the force generation under milling; rules of the forces distribution over the projections; and patterns of variation in the cut-off allowance under milling are determined and specified.
Discussion and Conclusions. The constructed mathematical model of the milling process dynamics and the software developed on its basis make it possible to evaluate the sound pressure levels created by both the cutting tool and the spindle case. This sound pressure actually determines the excess of noise levels over the maximum permissible values.

Ключевые слова: фрезерование, обработка древесины, силовое воздействие.

Keywords: milling, wood processing, power action.

---

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** OPM@rgups.ru nanorcsm@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Обеспечение требуемых показателей санитарных правил и норм (СанПиН) на этапе проектирования станочного оборудования является перспективным направлением, позволяющим существенно минимизировать расходы на создание и эксплуатацию станков, а также повысить их конкурентоспособность на отечественном и мировом рынках. Одной из необходимых составляющих расчета вибрации и шума, возникающих на станке, является определение возбуждающего силового воздействия на инструмент и деталь, вызывающего колебания. Данная тема наиболее актуальна для копировально-фрезерных деревообрабатывающих станков, частоты вращения шпинделей которых составляют 10 000–18 000 об/мин, что неизбежно приводит к интенсивному звуковому излучению, в особенности для многошпиндельных станков.

Данная работа посвящена определению параметров силовой последовательности, возникающей при фрезеровании древесины цилиндрическими фрезами. Анализ научных работ [1–15] показывает актуальность данной темы. В настоящее время не обнаружены публикации, посвященные определению спектральных составляющих силовой последовательности от процесса фрезерования, что затрудняет анализ моделей возбуждения шума и вибрации. Это определяет научную новизну результатов данного исследования.

1. Представление силовой последовательности как композиции детерминированных и стохастической составляющих. Рассмотрим представление и компоненты силовой последовательности, действующей на инструмент в процессе фрезерования. Они могут быть представлены [16] в виде

$$F(t) = F_0 + F_T(t) + F_n(t), \quad (1)$$

где $F(t)$ — силовая последовательность; F_0 — постоянная составляющая силовой последовательности; $F_T(t)$ — квазипериодическая составляющая силовой последовательности, формируемая процессом обработки; $F_n(t)$ — шумовая составляющая силовой последовательности, формируемая процессом резания.

Величина F_0 определяется, в первую очередь, глубиной срезаемого припуска, режимами резания и конфигурацией инструмента.

Величина $F_T(t)$ может быть представлена в виде ряда

$$F_T(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (2)$$

в котором для определения ведущей частоты ω используются частота вращения инструмента f и число зубьев фрезы

$$n{:}\omega = 2\pi f n\ . \quad (3)$$

При изменении частоты вращения инструмента ведущая частота смещается, что позволяет оптимизировать вибрацию и шум от станка.

Величина $F_n(t)$ аккумулирует шумовые и нерегулярные силовые воздействия, не учитываемые в предыдущих компонентах. Непериодические составляющие шумовой последовательности возникают как реакция инструмента на различные неоднородности в обрабатываемом материале и характеризуются широким непрерывным спектром с повышением в высокочастотной области.

С точки зрения достижения цели исследования — минимизации уровней шума и вибрации на этапе проектирования оборудования, наибольший интерес представляет анализ закономерностей формирования квазипериодической составляющей $F_T(t)$, т. к. именно она оказывает наибольшее влияние на формирование шума и вибрации и при этом наиболее управляема с точки зрения назначения режимов обработки и выбора инструмента.

Рассмотрим, каким образом происходит формирование $F_T(t)$ для случая обработки цилиндрической фрезой с прямыми и косыми зубьями.

2. Формирование силовой последовательности из сил, действующих на элементы фрезы. Рассматривая модельные силовые последовательности типа

$$\hat{F}(t) = F_0 + F_T(t), \quad (4)$$

не содержащие шумовой составляющей и полученные для элементарного диска фрезы, удобно перейти от векторного рассмотрения к скалярному, используя разложение на компоненты в трехмерном базисе, связанном с фрезой (рис. 1).

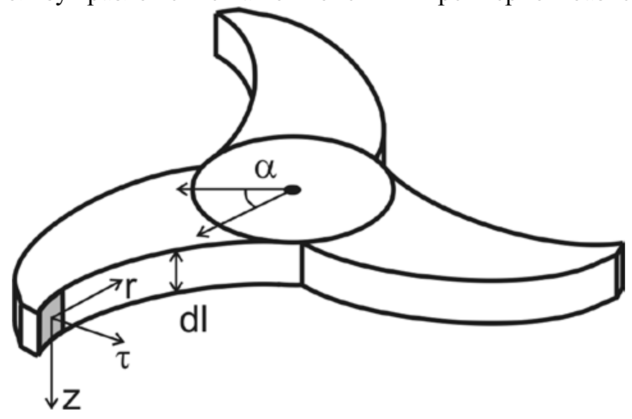


Рис. 1. Базис для разложения силового воздействия на элементарный диск фрезы

Fig. 1. Basis for power action resolution on the elementary cutter disk

При этом также удобно перейти от временного представления сил к рассмотрению их зависимости от угла поворота режущего зуба:

$$F_r(\alpha) = F_D \cdot \cos(\varpi)\cos(\gamma) + F_f \cdot \sin(\gamma)\cos(\varpi),$$
$$F_\tau(\alpha) = -F_D \cdot \cos(\varpi)\sin(\gamma) + F_f \cdot \cos(\gamma)\cos(\varpi) \qquad ,(5)$$
$$F_z(\alpha) = -F_D \cdot \sin(\varpi) + F_f \cdot \sin(\varpi),$$

где γ — передний угол заточки зуба фрезы; ϖ — угол винтовой линии фрезы; F_D — нормальная к передней поверхности зуба составляющая силы резания; F_f — сила трения стружки по передней поверхности зуба.

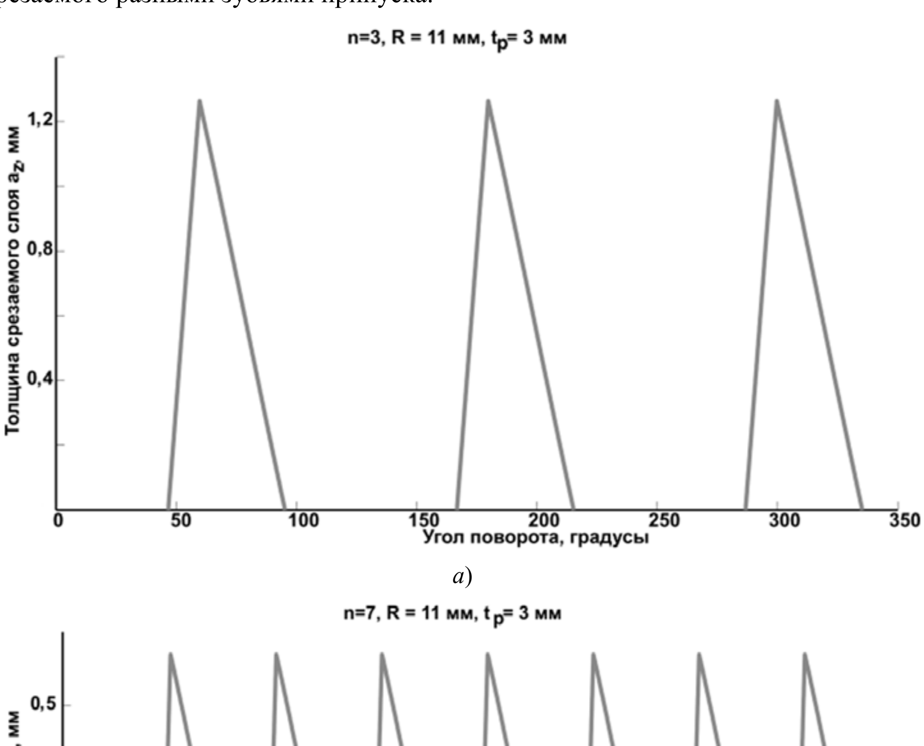
Величина силы резания F_P есть векторная сумма сил F_D и F_f. При этом ее модуль равен

$$|F_P| = \sqrt{|F_D|^2 + |F_f|^2} = \sqrt{|F_D|^2 + |k_f F_D|^2} = |F_D|\sqrt{1 + k_f^2}, \qquad (6)$$

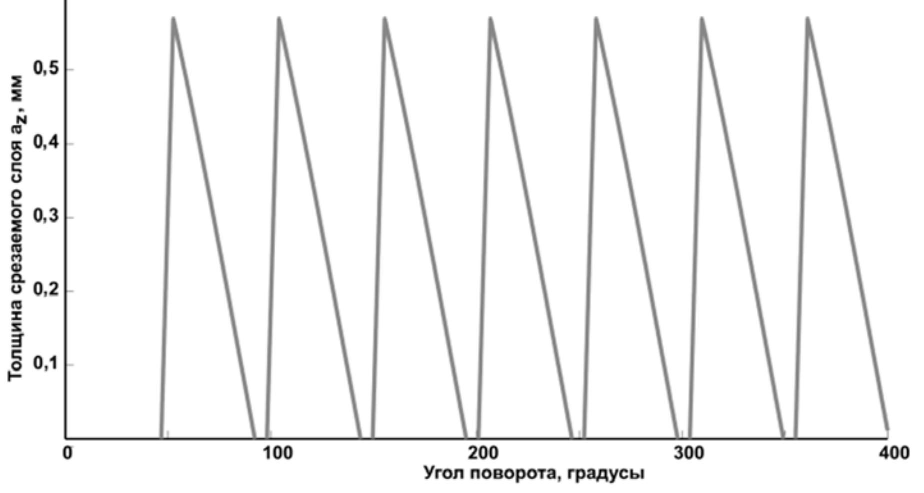
где k_f — коэффициент трения стружки по передней поверхности зуба.

Покажем, как формируется силовое воздействие на инструмент и заготовку в целом. Силовые воздействия на элемент фрезы складываются с учетом их векторной ориентации. В результате будет получена последовательность детерминированного воздействия, включающая в себя постоянную и периодическую составляющие.

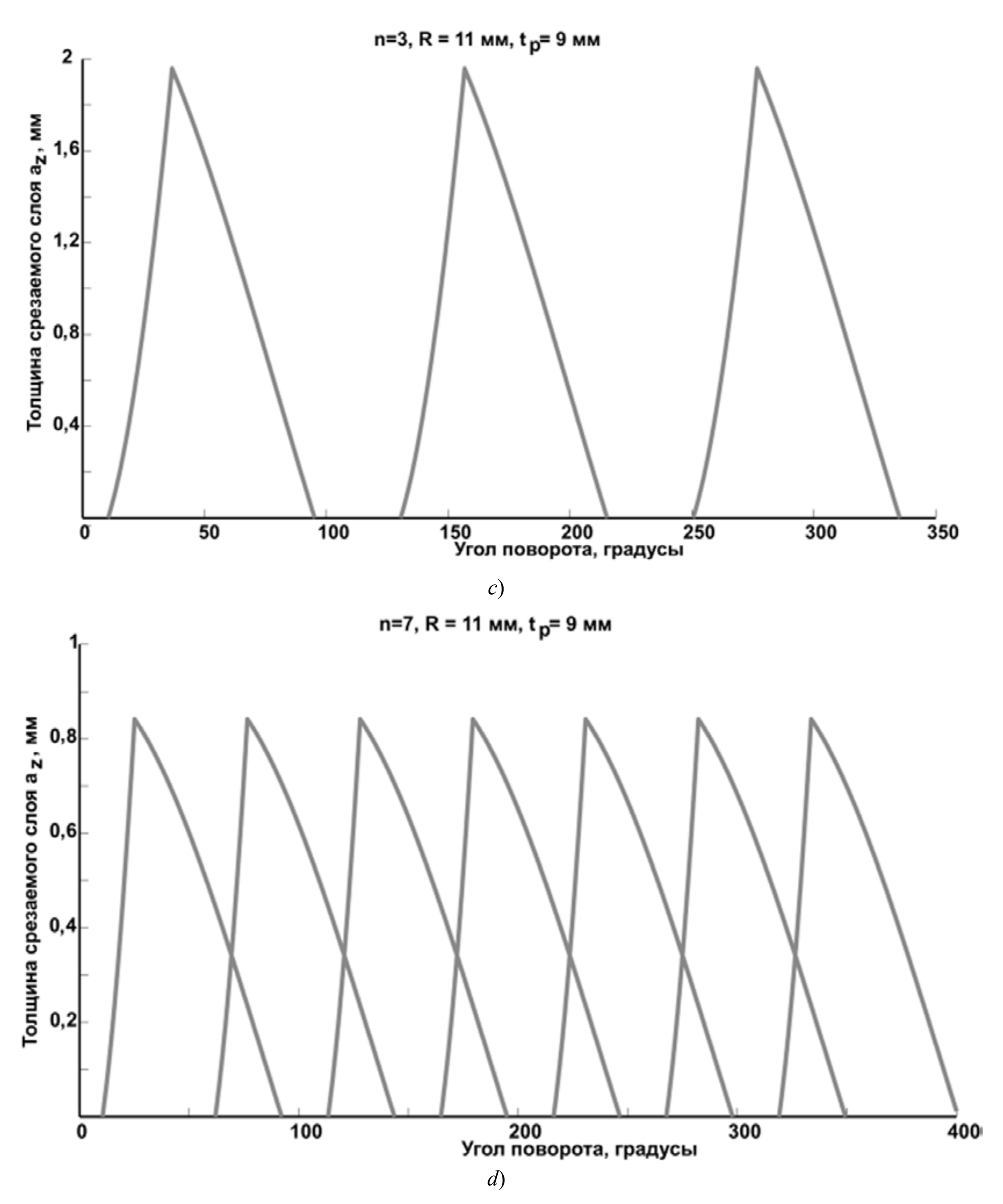
На рис. 2 приведены последовательности площади срезаемого слоя α_z при фрезеровании трех-, пяти- и семизубой фрезой диаметром 11 мм при разной величине срезаемого припуска (3 и 9 мм). Видно, что при увеличении числа зубьев или величины срезаемого припуска в определенный момент начинается одновременное резание более чем одним зубом. То есть при расчете величины формируемой силовой последовательности необходимо учитывать силы от одновременно срезаемого разными зубьями припуска.



а)



b)



c)

d)

Рис. 2. Площади срезаемого слоя α_z для фрез диаметром 11 мм с различным числом зубьев и различной толщиной срезаемого припуска: n = 3, R = 11 мм, t_p = 3 мм (*a*); n = 7, R = 11 мм, t_p = 3 мм (*b*); n = 3, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*c*); n = 7, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*d*)

Fig. 2. Area of cut-off layer α_z for mills with diameter of 11 mm with various number of teeth and various thicknesses of cut-off allowance: n = 3, R = 11 mm, t_p = 3 mm (*a*); n = 7, R = 11 mm, t_p = 3 mm (*b*); n = 3, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*c*); n = 7, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*d*)

Следует учесть тот факт, что скалярное сложение величины припуска от разных зубьев не даст верного результата, надо отдельно вычислять векторы сил резания от каждого из зубьев, а затем их складывать с учетом ориентации векторов. При этом силовое воздействие на инструмент целесообразно разделить на радиальное, приложенное к оси инструмента, и тангенциальное, формирующее момент сил сопротивления вращению, как это сделано в (5). Для прямозубой фрезы $F_z = 0$.

Приведем расчет для n = 5 и двух значений срезаемого припуска (рис. 3).

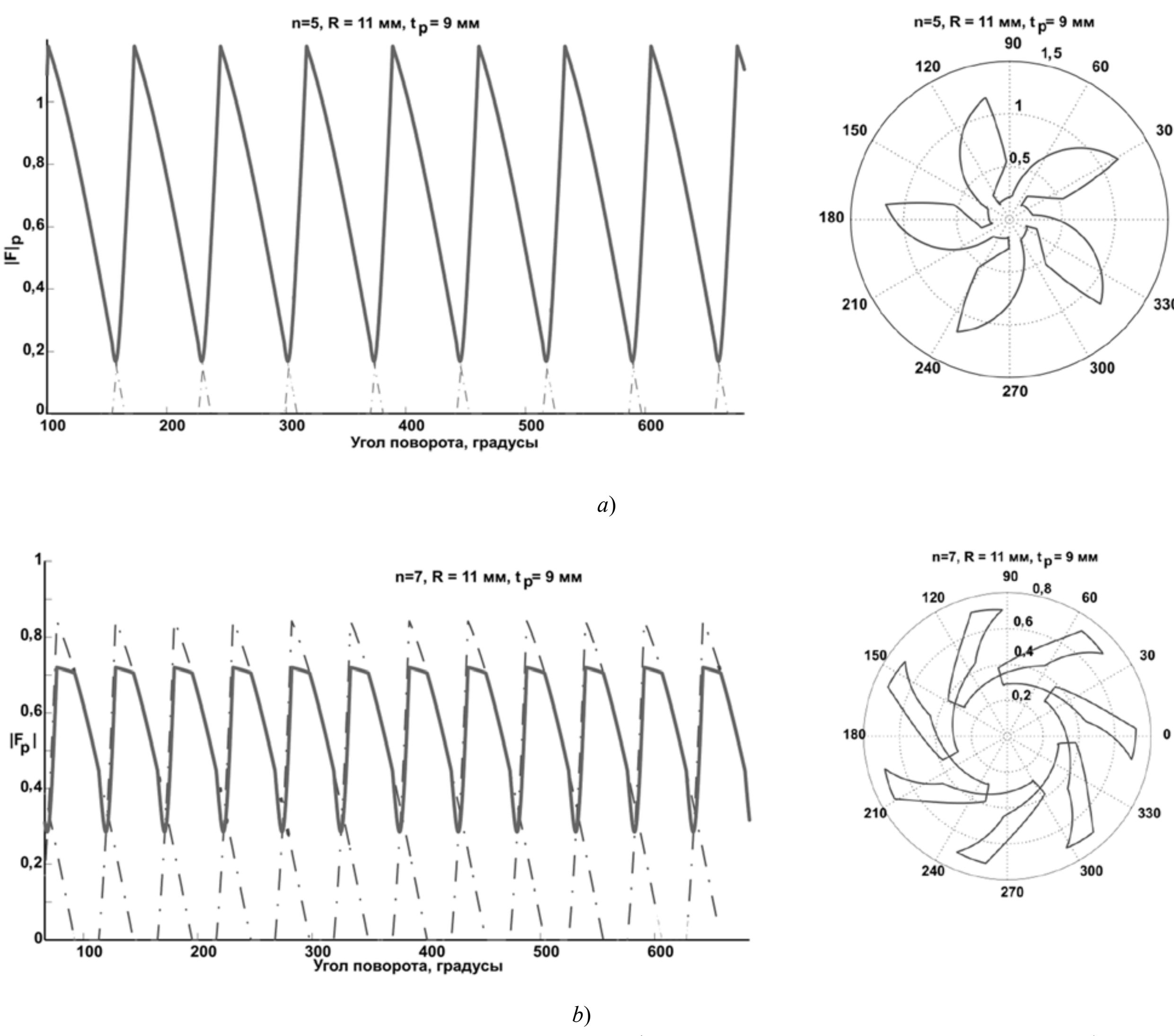


Рис. 3. Модули и углы смещения вектора суммарной силы резания для фрез диаметром 11 мм с различным числом зубьев и различной толщиной срезаемого припуска: n = 5, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*a*); n = 7, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*b*)

Fig. 3. Modules and displacement angles of the total cutting force vector for mills with diameter of 11 mm with various number of teeth and various thicknesses of cut-off allowance: n = 5, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*a*); n = 7, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*b*)

Угловое расстояние между зубьями фрезы φ = 72°. Эта же величина составляет угол между векторами сил резания от последовательных зубьев, если фреза начинает резать несколькими зубьями.

Модуль суммарной силы $\overrightarrow{F_{P,\Sigma}}$ определяется как

$$\left|\overrightarrow{F_{P,\Sigma}}\right| = \sqrt{\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|^2 + \left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|^2 - 2\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|\cos(\varphi)}. \quad (7)$$

Угол ориентации вектора суммарной силы резания может быть найден из треугольника, образуемого суммируемыми и результирующим векторами:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|}{\left|\overrightarrow{F_{P,\Sigma}}\right|}\sin(\varphi)\right) = \arcsin\left(\frac{\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|}{\sqrt{\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|^2 + \left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|^2 - 2\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|\cos(\varphi)}}\sin(\varphi)\right). \quad (8)$$

Для дальнейшего анализа силовых последовательностей разделим последовательности модуля сил резания, приведенные на рис. 3, на постоянную и периодическую составляющие. В табл. 1 приведены величины постоянной составляющей (верхнее значение) и амплитуды периодической составляющей (нижнее значение) для нескольких значений условий обработки.

Таблица 1

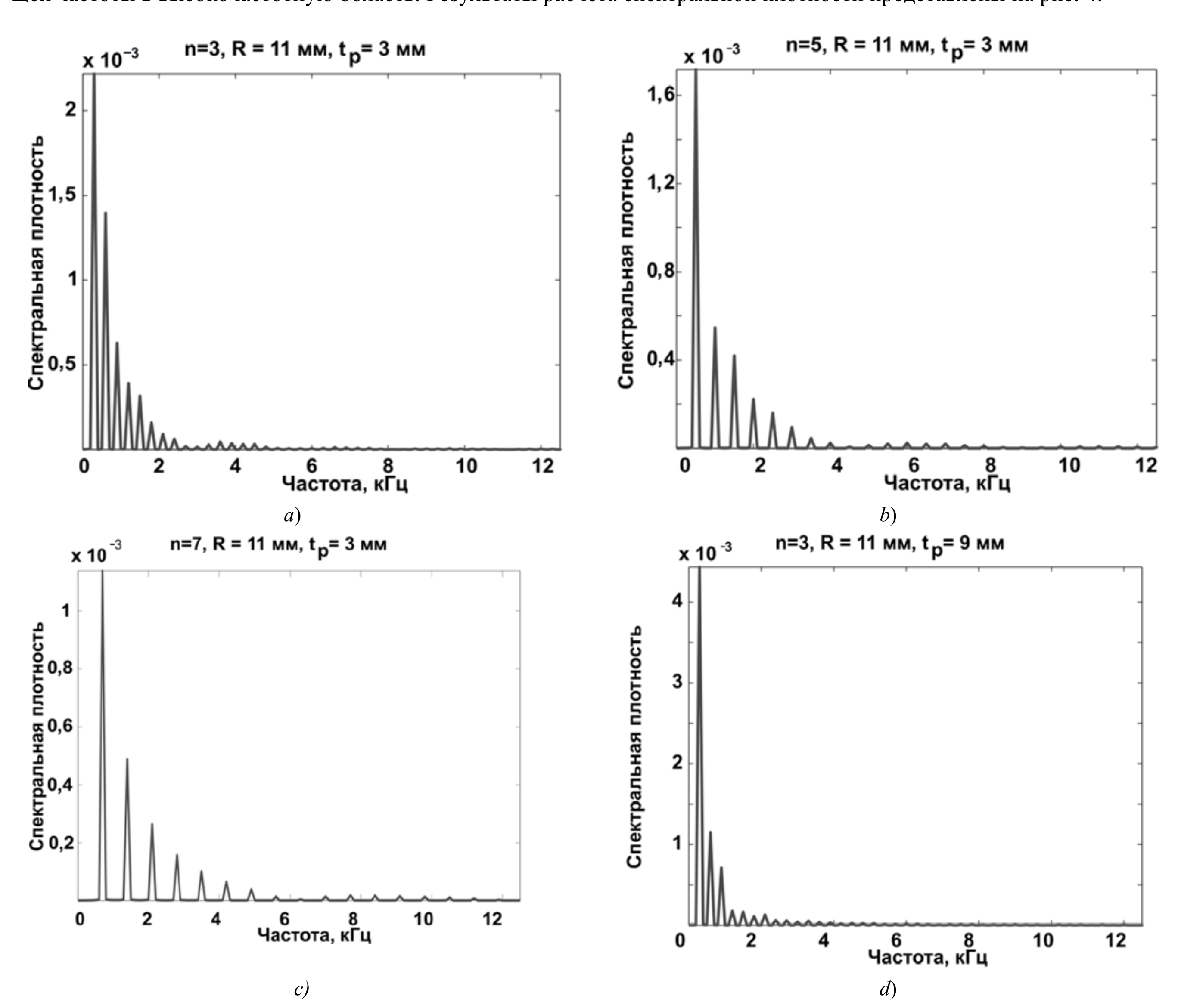
Table 1

Величина постоянной и переменной составляющих модуля силы резания

Magnitude of constant and variable components of the cutting force modulus

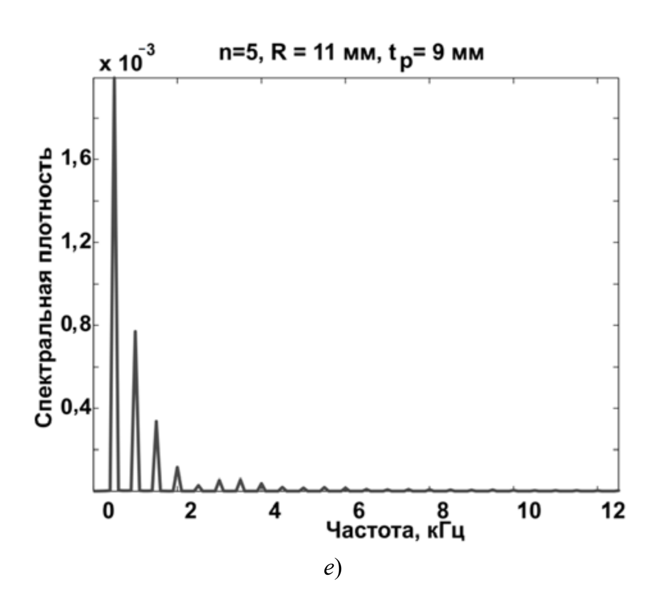
		Площадь срезаемого слоя, t_p, мм		
		3	5	9
Число зубьев фрезы, n	3	0,0	0,0	0,0
		1,26	1,61	1,96
	5	0,0	0,0	0,17
		0,79	0,98	1,01
	7	0,0	0,08	0,29
		0,57	0,62	0,43

При анализе частотных характеристик формируемых при фрезеровании силовых последовательностей следует учитывать тот факт, что увеличение числа зубьев фрезы при той же частоте вращения приводит к смещению ведущей частоты в высокочастотную область. Результаты расчета спектральной плотности представлены на рис. 4.

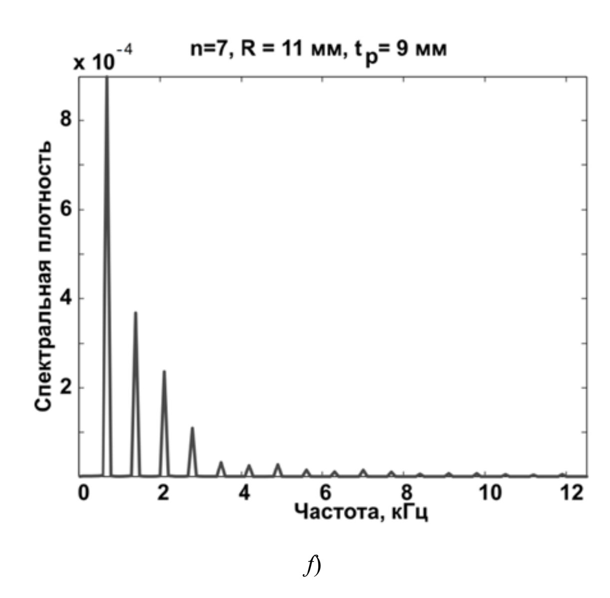


a) *b*)

c) *d*)



e)



f)

Рис. 4. Спектр силовой последовательности для фрез диаметром 11 мм с различным числом зубьев и различной толщиной срезаемого припуска. Частота вращения фрезы 6000 об/мин: $n = 3$, $R = 11$ мм, $t_p = 3$ мм (*a*); $n = 5$, $R = 11$ мм, $t_p = 3$ мм (*b*); $n = 7$, $R = 11$ мм, $t_p = 3$ мм (*c*); $n = 3$, $R = 11$ мм, $t_p = 9$ мм (*d*); $n = 5$, $R = 11$ мм, $t_p = 3$ мм (*e*); $n = 7$, $R = 11$ мм, $t_p = 9$ мм (*f*)

Fig. 4. Spectrum of power sequence for mills with diameter of 11 mm with various number of teeth and various thicknesses of cut-off allowance. Rotation frequency of the milling cutter is 6000 rpm: $n = 3$, $R = 11$ mm, $t_p = 3$ mm (*a*); $n = 5$, $R = 11$ mm, $t_p = 3$ mm (*b*); $n = 7$, $R = 11$ mm, $t_p = 3$ mm (*c*); $n = 3$, $R = 11$ mm, $t_p = 9$ mm (*d*); $n = 5$, $R = 11$ mm, $t_p = 3$ mm (*e*); $n = 7$, $R = 11$ mm, $t_p = 9$ mm (*f*)

Определяя в дальнейшем спектральную мощность случайной последовательности в регламентируемых частотных диапазонах, можно оценить величины вибрации и шума.

Заключение. На основе представленных выше результатов можно утверждать, что все декларированные при проведении исследования задачи решены. Определены закономерности формирования сил при фрезеровании, правила распределения их по проекциям, закономерности изменения величины срезаемого припуска. Построенная математическая модель динамики процесса фрезерования и разработанное на ее основе программное обеспечение позволяет оценивать показатели макрогеометрии обрабатываемых концевыми фрезами поверхностей.

Библиографический список

1 Новоселов, В. Г. Экспериментальное исследование изменения шероховатости обработанной поверхности в процессе фрезерования древесины / В. Г. Новоселов, И. Т. Рогожникова // Лесной журнал. — 2011. — № 6. — С. 70–75. — (Известия высших учебных заведений).

2 Батуев, В. В. Расчет толщины срезаемого слоя при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск / В. В. Батуев // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. — 2006. — № 3. — С. 119–123.

3 Хайдер, А. М. Исследование и разработка процесса фрезерования декоративных элементов мебели на станках с ЧПУ / А. М. Хайдер, В. С. Петровский, А. А. Грибанов // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. — 2012. — № 2. — С. 53–56.

4 Козлов, А. М. Методика подбора оптимальных режимов обработки для минимизации виброскорости при фрезеровании / А. М. Козлов, Е. В. Кирющенко // Современные фундаментальные и прикладные исследования. — 2012. — № 1–4. — С. 32–38.

5 Богачев, А. Н. Нагрузка, действующая на консоль ротора при фрезеровании / А. Н. Богачев, С. Н. Мухина // Вологдинские чтения. — 2010. — № 78. — С. 98–100.

6 Цаплин, П. В. Анализ стружкообразования при фрезеровании композиционных плит двухподвижной винтовой фрезой / П. В. Цаплин, А. Г. Ермолович, В. А. Меновщиков // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2010. — № 1. — С. 129–132.

7 Свинин, В. М. Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания : автореф. дис. … д-ра тех. наук / В. М. Свинин. — Иркутск, 2008. — 229 с.

8 Zakovorotny, V. L. Stability of Shaping Trajectories in Milling: Synergetic Concepts / V. L. Zakovorotny, A. A. Gubanova, A. D. Lukyanov // Russian Engineering Research. — 2016. — Vol. 36, № 11. — P. 956–964.

9 Zakovorotny, V. L. Parametric Self-Excitation of a Dynamic End-Milling Machine / V. L. Zakovorotny, A. A. Gubanova, A. D. Lukyanov // Russian Engineering Research. — 2016. — Vol. 36, № 12. — P. 1033–1039.

10 Заковоротный, В. Л. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 4. — С. 32–40.

11 Заковоротный, В. Л. Условия параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 6. — С. 10–16.

12 Заковоротный, В. Л. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 8. — С. 27–33.

13 Заковоротный, В. Л. Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай малой скорости резания) / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 52–66.

14 Заковоротный, В. Л. Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай большой скорости резания) / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 2 (85). — С. 32–42.

15 Козлов, А. М. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ / А. М. Козлов, Г. Е. Малютин // Вестник машиностроения. — 2014. — № 12. — С. 71–75.

References

1 Novoselov, V.G., Rogozhnikova, I.T. Eksperimental'noe issledovanie izmeneniya sherokhovatosti obrabotannoy poverkhnosti v protsesse frezerovaniya drevesiny. [Experimental investigation of wood surface roughness variation during milling.] Forestry Journal, 2011, no. 6, pp. 70–75 (in Russian).

2 Batuev, V.V. Raschet tolshchiny srezaemogo sloya pri frezerovanii prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostey, imeyushchikh stupenchatyy pripusk. [Calculation of cut-off layer thickness under milling spatially complex surfaces with stepped allowance.] Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAS, 2006, no. 3, pp. 119–123 (in Russian).

3 Haider, A. M., Petrovsky, V.S., Gribanov, A.A. Issledovanie i razrabotka protsessa frezerovaniya dekorativnykh elementov mebeli na stankakh s ChPU. [Research and development of process of milling of decorative elements of furniture on machines with CNC.] FES: Finance. Economy. Strategy. 2012, no. 2, pp. 53–56 (in Russian).

4 Kozlov, A.M., Kiryushcenko, E.V. Metodika podbora optimal'nykh rezhimov obrabotki dlya minimizatsii vibroskorosti pri frezerovanii. [The method of optimal cutting modes calculation to minimize vibration for milling process.] Modern Fundamental and Applied Researches, 2012, no. 1 (4), pp. 32–38 (in Russian).

5 Bogachev, A. N., Mukhina, S.N. Nagruzka, deystvuyushchaya na konsol' rotora pri frezerovanii. [Load acting on the rotor console during milling.] Vologdinskie chteniya, 2010, no. 78, pp. 98–100 (in Russian).

6 Tsaplin, P.V., Yermolovich, A.G., Menovshchikov, V.A. Analiz struzhkoobrazovaniya pri frezerovanii kompozitsionnykh plit dvukhpodvizhnoy vintovoy frezoy. [Analysis of chip formation during milling composite slabs by a double-screw screw mill.] The Bulletin of KrasGAU, 2010, no. 1, pp. 129–132 (in Russian).

7 Svinin, V.M. Upravlenie regenerativnymi avtokolebaniyami pri frezerovanii na osnove modulyatsii skorosti rezaniya: avtoref. dis. … d-ra tekh. Nauk. [Regenerative auto-oscillation control during milling based on modulation of cutting speed: Dr.Sci. (Eng.) diss., author’s abstract.] Irkutsk, 2008, 229 p. (in Russian).

8 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Stability of Shaping Trajectories in Milling: Synergetic Concepts. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 11, pp. 956–964.

9 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Parametric Self-Excitation of a Dynamic End-Milling Machine. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 12, pp. 1033–1039.

10 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Ispol'zovanie sinergeticheskoy kontseptsii dlya izucheniya ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya. [Use of synergetic concept for studying stability of forming trajectories of climb cutting.] STIN, 2016, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).

11 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Usloviya parametricheskogo samovozbuzhdeniya dinamicheskoy sistemy frezerovaniya kontsevymi frezami. [Conditions for parametric self-excitation of dynamic end milling system.] STIN, 2016, no. 6, pp. 10–16 (in Russian).

12 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevymi frezami. [Attracting sets under end milling.] STIN, 2016, no. 8, pp. 27–33 (in Russian).

13 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Sinergeticheskiy podkhod pri izuchenii ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya bokovymi granyami kontsevykh frez (sluchay maloy skorosti rezaniya). [Synergetic approach to studying stability of form-building trajectories of climb milling by side edges of endmills (low cutting speed case).] Vestnik of DSTU, 2016, no. 1 (85), pp. 50–62 (in Russian).

14 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Sinergeticheskiy podkhod pri izuchenii ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya bokovymi granyami kontsevykh frez (sluchay bol'shoy skorosti rezaniya.) [Synergetic approach to study forming path stability of the end cutdown milling by side faces (case of high speed cutting).] Vestnik of DSTU, 2016, no. 2 (85), pp. 32–42 (in Russian).

15 Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Povyshenie proizvoditel'nosti frezerovaniya vognutykh poverkhnostey slozhnoy formy na stankakh s ChPU. [Capability improvement of finishing milling of concave surfaces of complicated shape on NC machines.] Vestnik Mashinostroeniya, 2014, no. 12, pp. 71–75 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.01.2017
Сдана в редакцию 15.01.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 15.01.2017
Submitted 15.01.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Чукарин Александр Николаевич,
главный научный сотрудник Управления научных исследований Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Доктор технических наук, профессор,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1779-720X
OPM@rgups.ru

Голосной Сергей Владимирович,
аспирант Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2),
ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7717-8913
nanorcsm@mail.ru

Authors:

Chukarin, Alexander N.,
Senior Research Scholar of the Scientific Research Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1779-720X
OPM@rgups.ru

Golosnoy, Sergey V.,
postgraduate student, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2),
ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7717-8913
nanorcsm@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.382 10.23947/1992-5980-2017-17-2-88-98

Адаптивный гидропривод с объемным регулированием подачи инструмента технологической машины*

В. С. Сидоренко[1], В. И. Грищенко[2], С. В. Ракуленко[3], М. С. Полешкин[4] **

[1,2,3,4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Adaptive hydraulic drive with delivery tool-feed control of production machine***

V. S. Sidorenko[1], V. I. Grishchenko[2], S. V. Rakulenko[3], M. S. Poleshkin[4]**

[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассматривается разработка адаптивного гидропривода с объемным регулированием скорости подачи инструмента технологических машин на примере мобильной буровой установки УРБ-2,5. Для адаптации гидропривода подачи инструмента к изменяющейся нагрузке на приводе главного движения в процессе бурения был разработан гидравлический контур управления. Контур включает многофункциональный гидромеханический датчик, выполняющий функции мониторинга процесса бурения и управления оригинальным гидравлическим клапаном, позволяющим формировать давление управления гидромотором подачи инструмента.

Материалы и методы. Разработана обобщенная математическая модель адаптивного гидропривода с объемным регулированием. Проведен вычислительный эксперимент с целью идентификации процессов в оригинальном гидравлическом контуре управления гидромотором и приводе подачи инструмента в целом.

*Результаты исследования***.** Получены новые математические и компьютерные модели адаптивного гидропривода с объемным способом регулирования частоты вращения двухмассовой динамической системы и гидравлического контура управления с гидромеханическим многофункциональным устройством. Идентифицированы процессы, протекающие в гидравлическом контуре управления, доказана работоспособность предлагаемых схемотехнических решений. Определены количественные и качественные характеристики адаптивного привода, зависимости скоростей подачи и вращения инструмента и диапазон их изменений.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых буровых установок с различными характеристиками. Использование разработанных математических и компьютерных моделей позволит сократить затраты времени и средств при проектировании адаптивного гидропривода буровой установки, создании опытных образцов и пуско-наладочных работах.

Introduction. The development of the adaptive hydraulic drive with the volumetric tool-feeding speed control of the production machines using the example of the portable URB-2.5 drilling unit is considered. A hydraulic control circuit is developed for adapting the tool-feeding hydraulic drive to the discontinuous load on the main motion drive in the course of drilling. The circuit includes a multifunctional hydromechanical transmitter executing functions of the drilling process monitoring and the original hydraulic valve control that allows generating the control pressure of the tool-feed hydraulic drive.

Materials and Methods. A generic mathematical model of an adaptive hydraulic drive with delivery control is developed. A computational experiment is carried out to identify processes in the original hydraulic motor control circuit and in the tool-feed drive as a whole.

Research Results. New mathematical and computational models of the adaptive hydraulic drive with the volumetric method of the revolution control of the dual-mass dynamic system and the hydraulic control circuit with a hydromechanical multifunctional device are obtained. The processes running in the hydraulic control circuit are identified; the efficiency of the offered sheet-oriented solutions is proved. Quantitative and qualitative characteristics of the adaptive hydraulic drive, dependences of the tool feed and rotation velocities and their variation range are specified.

Discussion and Conclusions. The obtained results can be used to create new drilling rigs with various characteristics. The application of the developed mathematical and computational models will allow reducing time and resource expenditures under designing an adaptive hydraulic drive of the drilling rig, and creating prototype models and commissioning activities.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: v.sidorenko1942@gmail.com, vig84@yandex.ru, rakulenko84@mail.com, poleshkin.maks@gmail.com

*** The research is done within the frame of independent R&D.

Ключевые слова: адаптивный гидропривод, объемный способ регулирования, гидромеханический датчик, клапан с гидравлическим управлением.

Keywords: adaptive hydraulic drive, volumetric control method, hydromechanical transmitter, hydraulic control valve.

Введение. С развитием строительной индустрии в России возрастает потребность в проведении геологоразведочных работ, осуществляемых с помощью различных технологических машин. Эффективность таких машин в основном определяется энергоэффективностью, надежностью, производительностью и функциональными возможностями применяемых систем приводов [1, 2]. Поэтому совершенствование и создание новых эффективных систем приводов технологических машин является актуальной задачей [3, 4].

Работа проводилась в рамках совместных работ с изготовителем установок разведывательного бурения — предприятием ООО «Завод СтройНефтеМаш» (г. Ростов-на-Дону). Объектом исследования являлась наиболее широко применяемая при геологоразведочных работах мобильная буровая установка (МБУ) роторного бурения УРБ-2,5 [2].

Применяемый роторный способ бурения в мобильной буровой установке УРБ-2,5 является самым распространенным. Основными преимуществами вращателей роторного типа являются простота конструкции, большой ход подачи и возможность передачи больших крутящих моментов.

В процессе исследования гидроприводов главного движения и подачи установки УРБ-2,5 и ее аналогов УРБ-3А3, УРБ-2А2 были выявлены существенные недостатки:

- значительные потери мощности, снижение скоростных характеристик гидродвигателей и КПД привода, увеличение расхода топлива при применении дроссельного способа регулирования скорости;
- отсутствие устройств мониторинга стационарных процессов в реальном времени при проведении буровых работ;
- отсутствие обратной связи для согласования работы приводов в автоматическом режиме.

Для устранения вышеупомянутых недостатков был разработан усовершенствованный гидравлический привод МБУ с адаптивным машинным регулированием скорости подачи инструмента, обеспечивающим оригинальный контур гидравлического управления, образуемый многофункциональным управляющим устройством — гидромеханическим датчиком [5].

Обобщенная структура гидропривода. Обоснованию принципов построения гидропривода подачи инструмента технологических машин предшествовали систематизация и анализ известных схемотехнических решений и результатов научных исследований [6–12]. На этой основе были сформулированы основные принципы построения привода с улучшенными динамическими и энергетическими параметрами:

- адаптация динамической системы гидропривода подачи к изменяющимся нагрузочным характеристикам;
- создание системы управления с гидравлическими линиями связи, обеспечивающей согласованную работу гидропривода главного движения и подачи;
- создание многофункциональных управляющих устройств, позволяющих одновременно осуществлять мониторинг кинематических и силовых характеристик привода в реальном времени;
- разработка гидромеханических устройств, обеспечивающих построение интегрированной структуры гидропривода подачи из ограниченного состава функциональных блоков.

Авторами предложена обобщенная структура гидропривода технологической машины с зависимой подачей инструмента, представленная на рис. 1. Она поясняет состав и взаимные связи основных подсистем: механической, гидравлической силовой, управляющей и информационной.

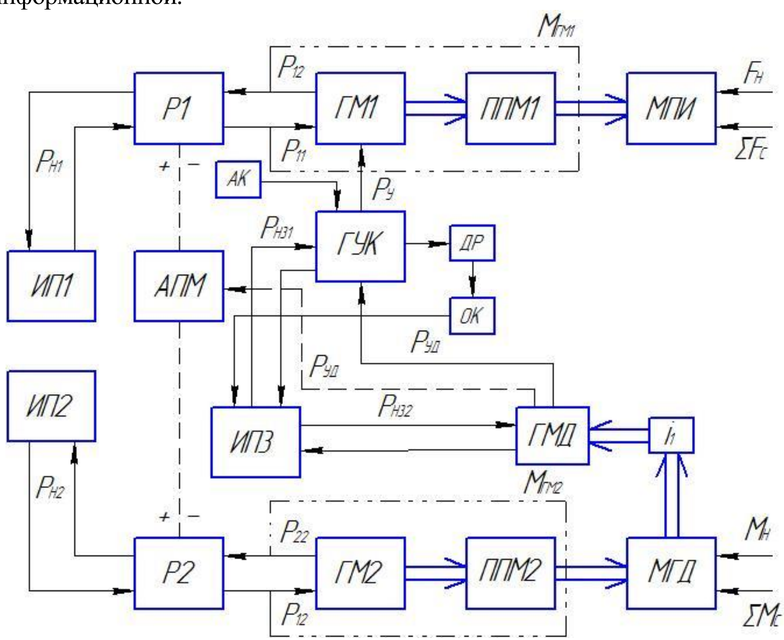


Рис. 1. Структурная схема гидромеханической системы рабочих движений технологической машины

Fig. 1. Structural diagram of hydromechanical system of working motions of production machine

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ИП1, ИП2 — источники питания силового контура; ИП3 — источник питания управляющего контура; Р1, Р2 — распределитель; ГМ1, ГМ2 — гидромоторы; ППМ1, ППМ2 — передаточно-преобразующие механизмы; МПИ — механизм подачи инструмента; МГД — механизм главного движения; i_1 — механическое сопряжение; $F_{н}$ — усилие нагрузки; $M_{н}$ — крутящий момент; АПМ — аппаратно-программный модуль; ГУК — клапан с гидравлическим управлением; ГМД — гидромеханический датчик; АК — аккумулятор; ДР — дроссель; КО — клапан обратный.

Силовая часть гидропривода состоит: из двух источников питания ИП1, ИП2; управляющих распределителей Р1, Р2; гидромотора, регулируемого ГМ1 (подача); гидромотора, нерегулируемого ГМ2 (главное движение). Она формирует параметры потока жидкости и преобразует его энергию в движение выходных звеньев ГМ1 и ГМ2. Изменением параметров потока реализуются различные способы управления гидромоторами.

Управляющая подсистема состоит из автономного источника питания ИП3, гидромеханического датчика ГМД, клапана с гидравлическим управлением ГУК, дросселя ДР, клапана обратного КО, аккумулятора АК. Подсистема реализует алгоритм согласования рабочих движений привода главного движения и подачи инструмента в автоматическом цикле за счет оригинального контура гидравлического управления.

Гидромеханический датчик ГМД кинематически связан механизмом сопряжения i_1 с вращением инструмента [5]. ГМД помимо информационно-измерительной функции реализует функцию управления гидроприводом, формируя на выходе амплитудно-частотный сигнал в виде импульсов давления.

Гидравлический сигнал преобразуется в ГУК, который впоследствии формирует управляющий сигнал от ИП3 в виде давления управления на блок регулятора гидромотора ГМ1. Уровень сигнала пропорционально изменяет рабочий объем гидромотора ГМ1 (рис. 3).

Информационный электрический сигнал от датчика давления ГМД, поступающий на аппаратно-программный модуль АПМ, позволяет в реальном времени производить мониторинг работы привода по энергетическим и силовым параметрам, сопоставлять их с заданными по технологии, в экстренных случаях отключать питание гидродвигателей ГМ1 и ГМ2, а также предупреждать о возможности возникновения опасности заклинивания инструмента.

Амплитудно-частотный сигнал, поступающий от ГМД, невозможно использовать без преобразования для управления рабочим объемом ГМ1. Для решения этой задачи был разработан специальный ГУК, который позволяет в зависимости от частоты и амплитуды колебания давления на управляющем входе формировать давление управления на выходе для регулирования ГМ1.

Математическая модель гидропривода. Расчетная схема на рис. 2, в соответствии с которой проводилось моделирование, поясняет работу привода, а также взаимные связи и параметры разработанной математической модели гидромеханической системы МБУ [10].

При увеличении нагрузки на валу гидромотора главного движения ГМ2, обороты привода начинают падать, что фиксируется ГМД. Частота импульсов давления падает, а амплитуда растет, что приводит к увеличению расхода через ГУК. В результате этого растет давление управления Ру для блока регулятора мотора ГМ1, рабочий объем увеличивается. При этом скорость подачи инструмента уменьшается из-за постоянства подачи насоса Н1.

По информационному каналу от ГМД данные отправляются на АПМ, обрабатываются и выводятся на экран оператора в виде графиков. По ним оператор может визуально оценить параметры процесса бурения. Связь АПМ с устройством «Электронная педаль газа» автомобильного шасси позволяет при резком возникновении избыточной нагрузки перевести обороты двигателя в режим холостого хода. Это позволит обезопасить узлы и механизмы МБУ от возникновения запредельных нагрузок.

При снижении нагрузки в приводе главного движения скорость подачи автоматически увеличивается. При этом стабилизируется величина подачи на один оборот инструмента и обеспечивается рациональный режим бурения по производительности и энергозатратам за счет объемного способа регулирования скорости подачи.

Учитывая сложности в реализации натурного эксперимента по исследованию гидропривода с зависимой подачей инструмента при бурении, для исследования предложенной обобщенной структуры составлена математическая модель, описывающая поведение привода подачи инструмента от динамики привода главного движения (вращения).

С учетом особенностей сложных гидромеханических систем [7, 8, 12], составлена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение привода подачи инструмента в рамках типового технологического цикла.

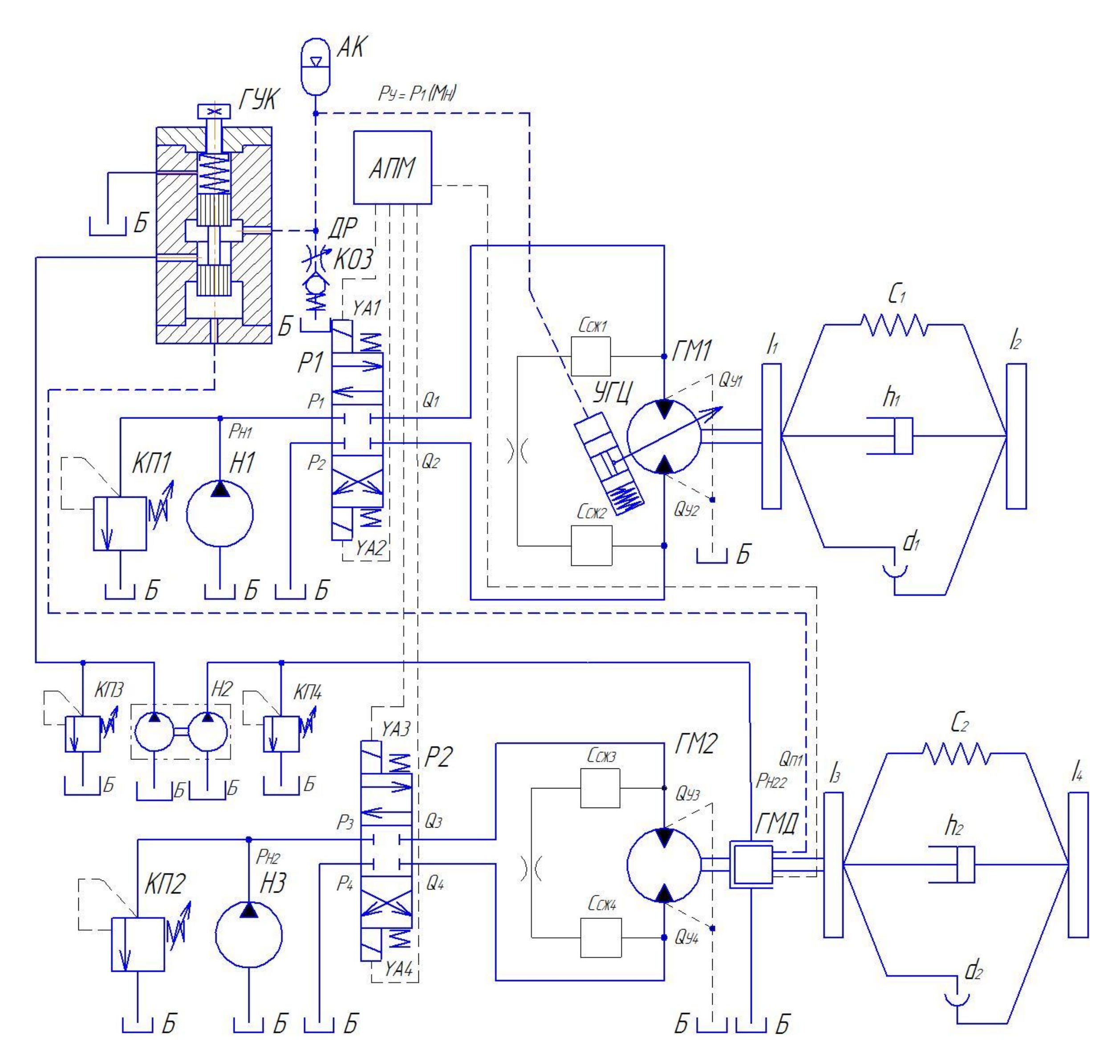


Рис. 2. Расчетная схема гидромеханической системы

Fig. 2. Analytical model of hydromechanical system

Механическая подсистема представлена как двухмассовая, путем приведения одной части ее составляющих к ведущим *Y*1, а другой — к ведомым *Y*2 массам для привода подачи. Для привода главного движения обозначим через *Y*3 ведущие, а через *Y*4 — ведомые массы [8].

При этом учитываются упругие свойства кинематической цепи от гидромотора ГМ1 и ГМ2 до суппорта подачи инструмента:

$$Y_1 \frac{d^2\phi_1}{dt^2} = M_{ГМ1} - M_{C1} - M_{1-2} - M_{ГМД}, \quad (1)$$

$$Y_2 \frac{d^2\phi_2}{dt^2} = M_{1-2} - F_{C2} - M_{H1}, \quad (2)$$

$$Y_3 \frac{d^2\phi_3}{dt^2} = M_{ГМ2} - M_{C3} - M_{3-4} - M_{ГМД}, \quad (3)$$

$$Y_4 \frac{d^2\phi_4}{dt^2} = M_{3-4} - F_{C3} - M_{H2}, \quad (4)$$

где $Y_1 \frac{d^2\phi_1}{dt^2}, Y_2 \frac{d^2\phi_2}{dt^2}$, $Y_3 \frac{d^2\phi_3}{dt^2}$, $Y_4 \frac{d^2\phi_4}{dt^2}$ — динамический момент от вращающихся масс Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Н·м; $M_{ГМ1} = \frac{1}{2\cdot\pi}\cdot q_{ГМ1}(p_y)\cdot(p_1 - p_2)$ — крутящий момент регулируемого гидромотора ГМ1от давления управления $p_у$, Н·м; $M_{ГМ2} = \frac{1}{2\cdot\pi}\cdot q_{ГМ2}(p_1^{'} - p_2^{'})$ — крутящий момент гидромотора ГМ2, Н·м; $M_{Hi} = M_{Hi}(F_{нi})$ — крутящий момент от нагрузки, создаваемой усилием подачи $F_н$ при бурении [1, 10], Н·м; M_{C1} и M_{C3} — соответственно крутящие моменты от сил сопротивления движению ГМ1 и ГМ2 (сухого и вязкого трения, позиционной нагрузки), определяемые выражениями:

$$M_{C1} = M_{T1} + M_{B1} + M_{П1} = M_{ТО1}\cdot \mathrm{Sign}\frac{d\phi_1}{dt} + K_B\cdot\frac{d\phi_1}{dt} + K_{П1}\cdot\phi_1, \quad (5)$$

$$M_{C3} = M_{T3} + M_{B3} + M_{П3} = M_{ТО2}\cdot \mathrm{Sign}\frac{d\phi_3}{dt} + K_B\cdot\frac{d\phi_3}{dt} + K_{П3}\cdot\phi_3; \quad (6)$$

M_{C2} и M_{C4} — моменты от сил сопротивления движению ведомых масс Y_2 и Y_4, определяемые выражениями:

$$M_{C2} = M_{T2} + M_{B2} + M_{П2} = M_{ТО1}\cdot \mathrm{Sign}\frac{d\phi_2}{dt} + M_{BT2}\cdot\frac{d\phi_2}{dt} + K_{П2}\cdot\phi_2, \quad (7)$$

$$M_{C4} = M_{T4} + M_{B4} + M_{П4} = M_{ТО2}\cdot \mathrm{Sign}\frac{d\phi_4}{dt} + M_{BT4}\cdot\frac{d\phi_4}{dt} + K_{П4}\cdot\phi_4; \quad (8)$$

M_{1-2} и M_{3-4} — упругие моменты кинематической связи масс Y_1, Y_2 и Y_3, Y_4 соответственно, определяемые выражениями:

$$M_{1-2} = h_1\cdot\left(\frac{d\phi_2}{dt} - \frac{d\phi_1}{dt}\right) + C_{\alpha1}\cdot(\phi_2 - \phi_1), \quad (9)$$

$$M_{3-4} = h_2\cdot\left(\frac{d\phi_4}{dt} - \frac{d\phi_3}{dt}\right) + C_{\alpha2}\cdot(\phi_4 - \phi_3); \quad (10)$$

$M_{ГМД}$ — крутящий момент на валу гидромеханического датчика, Н·м; M_{Ti} — момент от сил сухого трения, Н·м; M_{Bi} — момент от сил вязкого трения, Н·м; $M_{Пi}$ — момент сил позиционной нагрузки ГМ1 и ГМ2, Н·м; h_i — приведенный коэффициент демпфирования; $C_{\alpha i}$ — приведенный коэффициент жесткости; $\frac{d\phi_i}{dt}$ — приращение угловой координаты ГМ1 и ГМ2 во времени.

Поведение гидравлической силовой подсистемы гидропривода движения подачи описывают уравнения баланса расходов для напорной и сливной магистралей:

$$Q_1 = Q_{ГМ1} + Q_{У1} + Q_{П1} + Q_{СЖ1}, \quad (11)$$

$$Q_2 = Q_{ГМ1} - Q_{У2} + Q_{П1} + Q_{СЖ2}. \quad (12)$$

Поведение гидравлической силовой подсистемы гидропривода главного движения описывают уравнения баланса расходов для напорной и сливной магистралей:

$$Q_3 = Q_{ГМ2} + Q_{У3} + Q_{П2} + Q_{СЖ3}, \quad (13)$$

$$Q_4 = Q_{ГМ2} - Q_{У4} + Q_{П2} + Q_{СЖ4}. \quad (14)$$

Поведение гидравлической подсистемы управления гидроприводом подачи описывают уравнения баланса расходов в линии управления:

$$Q_{ГУК} = Q_{ДР} + Q_{АК} + Q_{У.ГМ} + Q_{СЖ5}, \quad (15)$$

где $Q_1 = \mu_1 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot x_{y1} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_H - p_1)}$, $Q_2 = \mu_2 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot x_{y2} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p_0)}$, $Q_3 = \mu_3 \cdot \pi \cdot d_3 \cdot x_{y3} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_{H2} - p_1^{'})}$, $Q_4 = \mu_4 \cdot \pi \cdot d_4 \cdot x_{y4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2^{'} - p_0)}$ — расходы через распределитель *Р*1и *Р*2 для напорной и сливной линий соответственно, м³/с; $Q_{ДР} = \mu_{ДР} \cdot f_{ДР} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_У - p_{КО})}$ — расход рабочей жидкости через дроссель, м³/с; $Q_{ГУК} = \mu_{ГУК} \cdot \pi \cdot d_{ГУК} \cdot x_{ГУК} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_{НД} - p_У)}$ — расход рабочей жидкости через ГУК, м³/с; $Q_{ГМ1} = q'_{ГМ1}(\gamma) \cdot \omega_1 \frac{d\phi_1}{dt}$ и $Q_{ГМ2} = q'_{ГМ2} \cdot \omega_3 \frac{d\phi_3}{dt}$ — расход на вращение вала гидромотора ГМ1 и ГМ2 соответственно, м³/с; $Q_{y1} = k_y \cdot p_1$, $Q_{y2} = k_y \cdot p_2$ и $Q_{y3} = k_y \cdot p_1^{'}$, $Q_{y4} = k_y \cdot p_4^{'}$ — расход утечек напорной и сливной гидромагистралей для контура подачи и главного движения соответственно, м³/с; $Q_{П1} = k_n \cdot (p_1 - p_2)$ и $Q_{П2} = k_n \cdot (p_1^{'} - p_2^{'})$ — расход перетечки рабочей жидкости, для контуров с ГМ1 и ГМ2 соответственно м³/с; $Q_{СЖi} = \frac{(q'_i / 2) + W_{iгл}}{E_{см}} \cdot \frac{dp_i}{dt}$ — расходы на компенсацию объемной деформации жидкости в магистралях гидродвигателей, м³/с; $Q_{СЖ.У} = \frac{W_У}{E_{см}} \cdot \frac{dp_{У.ГМ}}{dt}$ — расходы на компенсацию объемной деформации жидкости в линии управления гидромотором подачи инструмента, м³/с; $Q_{АК}$ — расход рабочей жидкости при перемещении подвижного элемента гидроаккумулятора, м³/с; $Q_{У.ГМ}$ — расход рабочей жидкости при перемещении подвижного элемента блока управления гидромотором, м³/с; $q'_{ГМ1} = f(p_У)$ — рабочий объем гидромотора ГМ1 как функция от давления управления (рис. 3), м³; μ_i — коэффициент расхода проточной части регулирующих устройств; x_{yi} — перемещение запорно-регулирующего элемента, м; p_{H1} и p_{H2} — давление в напорной гидролинии насоса *Н*1 и *Н*2 соответственно, Па; p_0 — давление в сливной гидролинии, Па; ω_1 и ω_3 — скорости вала гидромотора ГМ1 и ГМ2 соответственно, рад/с; d_i — диаметр проточной части гидрораспределителей *Р*1 и *Р*2, м; ρ — плотность рабочей жидкости, кг/м³; k_y, $k_п$, — коэффициенты утечки и перетечки соответственно; $E_{см}$ — модуль объемной упругости рабочей жидкости, учитывающий растворенный воздух, Па; $W_{iгл}$ — объем *i*-го участка гидролинии, м³; $\frac{dp_i}{dt}$ — приращение давления в полостях гидромотора ГМ1 и ГМ2.



Рис. 3. График зависимости $q'_{ГМ1} = f(p_У)$

Fig. 3. $q'_{ГМ1} = f(p_У)$ dependency graph

Решение системы уравнений математической модели осложняется нестационарностью протекающих в ней динамических процессов и особенностями поведения рабочей жидкости [9, 11]. Поэтому авторами были приняты следующие допущения: утечки малы и могут быть ограничены коэффициентом утечки k_y [8]; трубопроводы короткие, гладкие, жесткие, что позволяет не учитывать волновые процессы в потоках рабочей жидкости; динамические процессы протекают в окрестности точки нагрузочной характеристики привода, поэтому: $Q_H = const$, $p_н = p_{клmax} = const$; рабочая жидкость сжимаемая, капельная, в каналах присутствует нерастворённый воздух; сосредоточенный объём сжимаемой жидкости $Q_{сж}$ считаем присоединенным к рабочей полости гидродвигателя.

Построение и моделирование системы гидропривода проводилось в несколько этапов с использованием программного пакета *MatLab Simulink* и подсистемы модульного программирования *Simscape*.

В силу сложности реализации математической модели гидромеханической двухмассовой системы каждого контура, она формировалась путем последовательного усложнения базовой одномассовой модели, с корректировкой параметров на каждом этапе моделирования [12].

Вычислительный эксперимент. Основные исходные данные, характерные для базового режима работы буровой установки [1, 2], используемые при моделировании (табл. 1), основаны на данных технической документации (ТУ предприятия изготовителя ООО «Завод СтройНефтеМаш») и идентификации рабочих процессов при испытаниях.

Таблица 1

Table 1

Исходные данные для моделирования

Initial data for modeling

№ п/п	Параметры	Обозначение	Главное движение (ГМ2)	Обозначение	Подача инст. (ГМ1)
1	Перемещение	ϕ_2	0–∞ рад	ϕ_4	0–100 м
2	Скорость	ω_1	0–125 рад/с	ω_3	0–2,2 м/с
3	Технологическая нагрузка	M_{Hi}	0–1800 Н·м	$F_{нi}$	$0–25 \cdot 10^3$ Н
4	Рабочий объем гидродвигателя	$q_{ГМ1}$	160 $см^3$	$q_{ГМ2}$	112 $см^3$
5	Давление на входе в гидродвигатель, не более	p_1	$18 \cdot 10^6$ Па	p_1'	$18 \cdot 10^6$ Па
6	Давление на выходе гидродвигателя, не более	p_2	$1,5 \cdot 10^6$ Па	p_2'	$1,5 \cdot 10^6$ Па
7	Масса перемещаемого целевого механизма	$m_{ЦМ}$	400 кг		
8	Давление в напорной линии насоса	p_{H1}	$20 \cdot 10^6$ Па	p_{H2}	$20 \cdot 10^6$ Па
9	Давление в сливной гидролинии	p_0	$0,5 \cdot 10^6$ Па		
10	Давление управления	$p_У$	$(0,6–2) \cdot 10^6$ Па		
11	Диаметр гидролиний	$d_{лi}$	0,02 м		
12	Суммарная длина гидролиний	$\Sigma l_л$	8 м		

На рис. 4 изображена типовая осциллограмма процесса адаптации привода подачи инструмента к изменениям нагрузки на приводе главного движения. При вычислительном эксперименте ГМД, частота вращения

вала которого зависит от частоты вращения вала гидромотора главного движения, моделирование осуществлялось как изменение площади живого сечения датчика по синусоидальному закону.

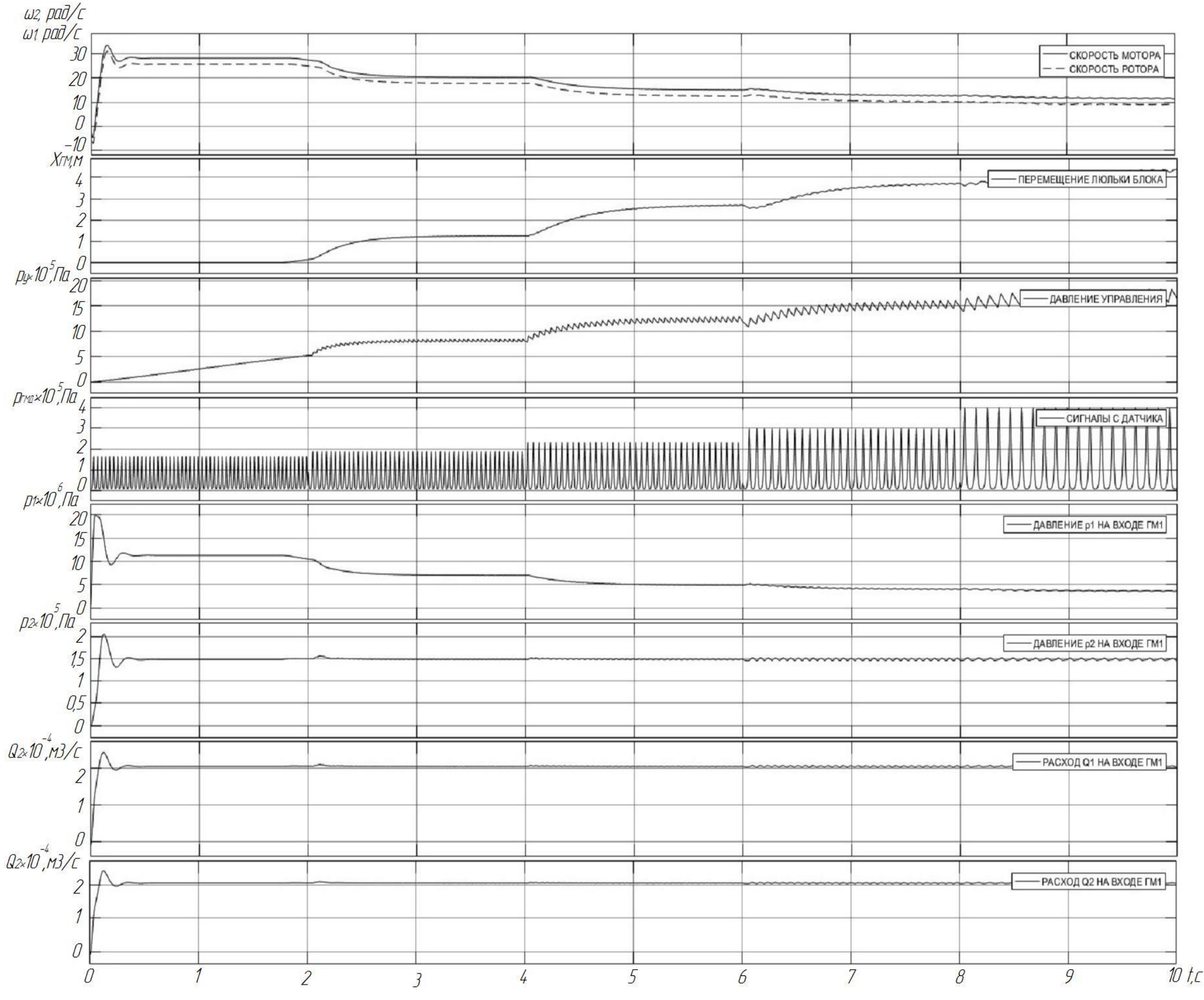


Рис. 4. Типовая осциллограмма процесса адаптации привода подачи инструмента к изменению нагрузки

Fig. 4. Standard oscilloscope pattern of adaptation process of tool feeding drive to load variation

В период времени от 0 до 2 сек. частота изменения площади живого сечения ГМД соответствовала частоте вращения вала гидромотора главного движения, равной 1200 об/мин. Далее соответственно: от 2 до 4 сек. — 1070 об/мин; от 4 до 6 сек. — 860 об/мин; от 6 до 8 сек. — 644 об/мин; от 8 до 10 сек. — 430 об/мин. При этом изменялись частота и амплитуда давления управления, формируемого датчиком.

В зависимости от частоты и амплитуды этих сигналов происходило изменение проточной части ГУК, что приводило к изменению расхода РЖ через него (рис. 4). Чем меньше частота и выше амплитуда сигналов, поступающих от датчика, тем выше приращение объемов РЖ в полости управления гидромотором в единицу времени и тем выше давление управления (рис. 4). Повышение давления управления приводит к увеличению рабочего объема гидромотора (рис. 3) и уменьшению частоты вращения его вала.

Результаты вычислительного эксперимента. Вычислительный эксперимент позволил идентифицировать процессы, протекающие в оригинальном гидравлическом контуре управления адаптивным приводом. Качественные и количественные характеристики моделируемой гидросистемы хорошо согласуются с рабочими процессами технологической машины. Переходные процессы устойчивые и не превышают установленных норм.

В результате вычислительного эксперимента получена зависимость частоты вращения вала гидромотора подачи инструмента от частоты вращения вала гидромотора главного движения (рис. 5).

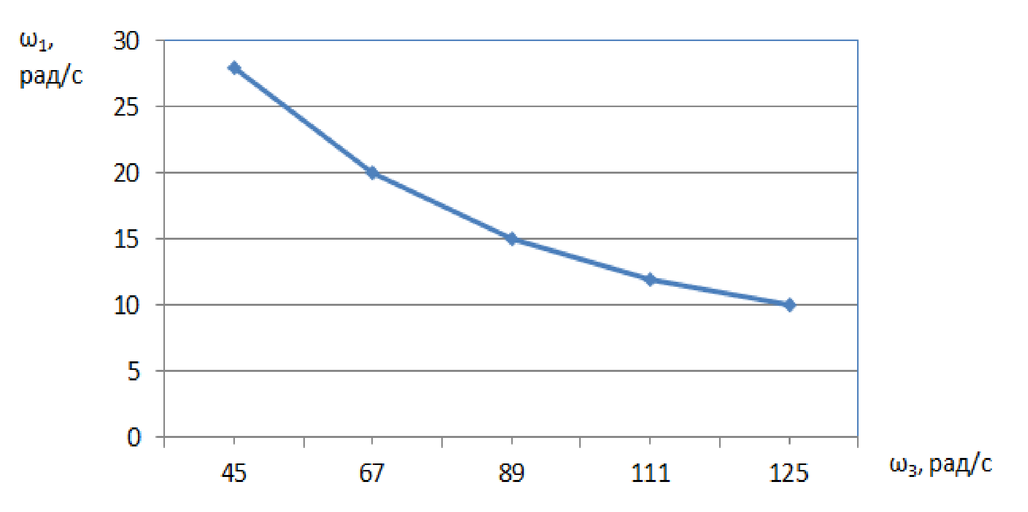


Рис. 5. Зависимость частот вращения валов гидромоторов подачи ω_1 и вращения инструмента ω_3

Fig. 5. Dependence of shaft speeds of feed hydraulic motors ω_1 and tool rotation ω_3

На рис. 5 продемонстрировано, что зависимость частоты вращения вала гидромотора главного движения от частоты вращения вала гидромотора подачи инструмента близка к линейной и удовлетворяет требованиям, предъявляемым ООО «Завод СтройНефтеМаш» к буровым установкам такого типа [2].

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых буровых установок с различными характеристиками. Использование разработанных математических и компьютерных моделей позволит сократить затраты времени и средств при проектировании адаптивного гидропривода буровой установки, создании опытных образцов и пуско-наладочных работах. Разработка многофункционального гидромеханического датчика в контуре управления гидроприводом позволит существенно упростить мониторинг, анализ и синтез процесса бурения скважин.

Библиографический список

1. Басарыгин, Ю. М. Технология бурения нефтяных и газовых скважин / Ю. М. Басарыгин, А. И. Булатов, Ю. М. Проселков. — Москва : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. — 679 с.

2. Установки разведочного бурения 58821–0000010, 58822–0000010, 5882–0000010 (УРБ-2.5). Технические условия 3662–602–70654677–2007. — ЗАО «Завод Стройнефтемаш», 2007. — 30 с.

3. Сельскохозяйственные машины: теория, расчет, конструкция, использование / В. В. Радин [и др.]. — Зерноград : АЧГАА, 2013. — 512 с.

4. Грищенко, В. И. Повышение точности быстродействующего пневмогидравлического привода механизмов машин : дис. канд. техн. наук. / В. И. Грищенко. — Ростов-на-Дону, 2010. — 131 с.

5. Гидравлический датчик : патент 2538071 Рос. Федерация : G01P3 / 32 / В. С. Сидоренко, Ле Чунг Киен, С. В. Ракуленко. — № 2013177045; заявл. 07.06.13; опубл. 10.01.15, Бюл. №1. — 3 с.

6. Гидравлический позиционный привод : патент 2458261 Рос. Федерация : F15B 11 / 12 / М. С. Полешкин, В. С. Сидоренко, В. И. Грищенко. — № 2009149046; заявл. 30.12.09; опубл. 10.08.12, Бюл. № 22. — 5 с.

7. Грищенко, В. И. Моделирование процесса позиционирования исполнительных механизмов технологического оборудования дискретным пневмогидравлическим устройством с пневматическими линиями связи / В. И. Грищенко, В. С. Сидоренко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2009. — Т. 9, № 2. — С. 81–89.

8. Аль-Кудах, А. М. Моделирование процесса позиционирования поворотно-делительных механизмов автоматического технологического оборудования устройствами с гидравлическими линиями связи / А. М. Аль-Кудах, В. С. Сидоренко, В. И. Грищенко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2008. — Т. 8, № 4 (39). — С. 191–201.

9. Полешкин, М. С. Идентификация рабочих процессов в многофункциональном тормозном устройстве / М. С. Полешкин, А. М. Аль-Кудах, В. И. Грищенко, В. С. Сидоренко // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика : тезисы докл. XII междунар. науч.-техн. конф. — Москва, 2008. — С. 54–55.

10. Ракуленко, С. В. Моделирование гидравлической системы с зависимой подачей инструмента мобильной буровой установки / С. В. Ракуленко, М. С. Полешкин, В. И. Грищенко, В. С. Сидоренко // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития – 2016 : сб. науч. трудов IX междунар. науч.-техн. конф. — Санкт-Петербург, 2016. — С. 365–375.

11. Полешкин, М. С. Нестационарные гидромеханические характеристики проточной части управляющих устройств клапанного типа / М. С. Полешкин, В. С. Сидоренко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 9, спец. вып. — С. 93–102.

12. Полешкин, М. С. Математическое моделирование автоматизированного позиционного гидропривода целевых механизмов машин с контуром гидравлического управления повышенной эффективности [Электронный ресурс] / М. С. Полешкин, В. С. Сидоренко // Инженерный Вестник Дона. — 2012. — № 3. — Режим доступа : http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/947 (дата обращения 10.03.17).

References

1. Basarygin, Y.M., Bulatov, A.I., Proselkov, Y.M. Tekhnologiya bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin. [Technology of drilling oil and gas wells.] Moscow: LLC «Nedra-Biznestsentr», 2001, 679 p. (in Russian).

2. Ustanovki razvedochnogo bureniya 58821–0000010, 58822–0000010, 5882–0000010 (URB-2.5). Tekhnicheskie usloviya 3662–602–70654677–2007. [Installations for exploratory drilling 58821-0000010, 58822-0000010, 5882-0000010 (URB-2.5). Specifications 3662-602-70654677-2007.] CJSC «Zavod Stroyneftemash», 2007, 30 p. (in Russian).

3. Radin, V.V., et al. Sel'skokhozyaystvennye mashiny: teoriya, raschet, konstruktsiya, ispol'zovanie. [Agricultural machines: theory, calculation, design, use.] Zernograd: AChGAA, 2013, 512 p. (in Russian).

4. Grishchenko, V.I. Povyshenie tochnosti bystrodeystvuyushchego pnevmogidravlicheskogo privoda mekhanizmov mashin: dis. kand. tekhn. nauk. [Increase in accuracy of high-speed pneumohydraulic drive of machines: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2010, 131 p. (in Russian).

5. Sidorenko, V.S., Le Chung Kien, Rakulenko, S.V. Gidravlicheskiy datchik : patent 2538071 Ros. Federatsiya: G01P3 / 32. [Hydraulic sensor.] Patent RF, no. 2538071, 2015 (in Russian).

6. Poleshkin, M.S., Sidorenko, V.S., Grishchenko, V.I. Gidravlicheskiy pozitsionnyy privod: patent 2458261 Ros. Federatsiya : F15B 11 / 12. [Hydraulic positioning drive] Patent RF, no. 2458261, 2012 (in Russian).

7. Grishchenko, V.I., Sidorenko, V.S. Modelirovanie protsessa pozitsionirovaniya ispolnitel'nykh mekhanizmov tekhnologicheskogo oborudovaniya diskretnym pnevmogidravlicheskim ustroystvom s pnevmaticheskimi liniyami svyazi. [Modeling process positioning of executive mechanisms of technology equipment of discrete pneumohydraulic device with pneumatic communication lines.] Vestnik of DSTU, 2009, vol. 9, no. 2, pp. 81–89 (in Russian).

8. Al-Qudah, A.M., Sidorenko, V.S., Grishchenko, V.I. Modelirovanie protsessa pozitsionirovaniya povorotno-delitel'nykh mekhanizmov avtomaticheskogo tekhnologicheskogo oborudovaniya ustroystvami s gidravlicheskimi liniyami svyazi. [Positioning process modeling of automated manufacturing equipment of rotary-divided mechanisms with hydraulic lines.] Vestnik of DSTU, 2008, vol. 8, no. 4 (39), pp. 191–201 (in Russian).

9. Poleshkin, M.S., Al-Qudah, A.M., Grishchenko, V.I., Sidorenko, V.S. Identifikatsiya rabochikh protsessov v mnogofunktsional'nom tormoznom ustroystve. [Identification of work processes in multifunction braking device.] Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika: tezisy dokl. XII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Hydraulic machines, hydraulic drives, and hydropneumatic automation: Proc. XII Int. Sci.-Tech. Conf.] Moscow, 2008, pp. 54–55 (in Russian).

10. Rakulenko, S.V., Poleshkin, M.S., Grishchenko, V.I., Sidorenko, V.S. Modelirovanie gidravlicheskoy sistemy s zavisimoy podachey instrumenta mobil'noy burovoy ustanovki.[Modeling of hydraulic system with dependent tool feed of mobile drilling rig.] Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya – 2016: sb. nauch. trudov IX mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Hydraulic machines, hydraulic drives, and hydropneumatic automation. Current state and development prospects – 2016: Proc. IX Int. Sci.-Tech. Conf.] St. Petersburg, 2016, pp. 365–375 (in Russian).

11. Poleshkin, M.S., Sidorenko, V.S. Nestatsionarnye gidromekhanicheskie kharakteristiki protochnoy chasti upravlyayushchikh ustroystv klapannogo tipa. [Unsteady hydromechanical specifications of valve flow operator.] Vestnik of DSTU, 2012, vol. 9, no. 6, pp. 93–102 (in Russian).

12. Poleshkin, M.S., Sidorenko, V.S. Matematicheskoe modelirovanie avtomatizirovannogo pozitsionnogo gidroprivoda tselevykh mekhanizmov mashin s konturom gidravlicheskogo upravleniya povyshennoy effektivnosti. [Mathematical

modeling of the automated positioning hydraulic drive of special purpose machines with hydraulic control circuit of increased efficiency.] Engineering Journal of Don, 2012, no. 3. Available at: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/947 (accessed: 10.03.17) (in Russian).

Поступила в редакцию 22.02.2017
Сдана в редакцию 22.02.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 22.02.2017
Submitted 22.02.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Сидоренко Валентин Сергеевич,
профессор кафедры «Гидравлика, гидропневмо-автоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5124-6324
v.sidorenko1942@gmail.com

Грищенко Вячеслав Игоревич,
доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмо-автоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID : http://orcid.org/0000-0003-1422-2811
vig84@yandex.ru

Ракуленко Станислав Вадимович,
старший преподаватель кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-8293-0305
rakulenko84@mail.com

Полешкин Максим Сергеевич,
доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмо-автоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-5364-1106
poleshkin.maks@gmail.com

Authors:

Sidorenko, Valentin S.,
professor of the Hydraulics, Hydropneumoautomation and Heat Processes Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5124-6324
v.sidorenko1942@gmail.com

Grishchenko, Vyacheslav I.,
associate professor of the Hydraulics, Hydropneumoautomation and Heat Processes Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID : http://orcid.org/0000-0003-1422-2811
vig84@yandex.ru

Rakulenko, Stanislav V.,
senior lecturer of the Hydraulics, Hydropneumoautomation and Heat Processes Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-8293-0305
rakulenko84@mail.com

Poleshkin, Maxim S.,
associate professor of the Hydraulics, Hydropneumoautomation and Heat Processes Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-5364-1106
poleshkin.maks@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669.046.56 10.23947/1992-5980-2017-17-2-99-107

Разработка методов и алгоритмов системы оценки параметров режимов обезуглероживания и дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи*

Э. Э. Меркер[1], В. А. Степанов[2], Л. Н. Крахт[3], А. Ю. Кем[4]**
[1,2,3] Старооскольский технологический институт, г. Старый Оскол, Российская Федерация
[4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Development of methods and algorithms for parameter estimation system of decarburization and combustible gas afterburning modes in an electric arc furnace***

E. E. Merker[1], V. A. Stepanov[2], L. N. Krakht[3], A. Y.Kem[4]**
[1,2,3] Stary Oskol Technological Institute, Stary Oskol, Russian Federation
[4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В настоящее время в российской металлургии тепло отходящих газов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) используется неэффективно. Это определяет актуальность задачи разработки методов контроля степени дожигания CO до CO_2 при выплавке стали в ДСП.
Материалы и методы. Для решения задачи используется математическая модель режимов обезуглероживания и дожигания отходящих газов при электроплавке металлизованных окатышей в условиях их непрерывной подачи в ванну ДСП. Предложенная модель позволяет оценить параметры режимов обезуглероживания и дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи. Исследована роль составляющих скорости окисления углерода в общем режиме обезуглероживания и дожигания газов в дуговой сталеплавильной печи.
Результаты исследования. Экспериментально подтверждена возможность и доказана эффективность дожигания оксида углерода струями кислорода в системе встречных газовых потоков. Это позволило ускорить процессы нагрева и обезуглероживания металла, а также улучшить другие технологические показатели электроплавки стали.
Обсуждение и заключение. Результаты математического моделирования показали, что новый метод подачи кислорода через топливно-кислородные горелки и кислородную фурму обеспечивает повышение энергоэффективности электроплавки стали в дуговой сталеплавильной печи.

Introduction. Currently, in the Russian metallurgy, waste-gas heat under steelmaking in the electric arc furnace (EAF) is used inefficiently. This determines the urgency of the task to develop methods for CO to CO_2 afterburning degree control under steelmaking in the EAF.
Materials and Methods. A mathematical model of the decarburization and combustible gas afterburning modes under the reduced pellets electrosmelting at their continuous feed to the EAF bath is used to solve the problem. The proposed model allows estimating the mode parameters of the decarburization and combustible gas afterburning in the electric arc furnace. The role of the rate of carbon oxidation components in the common mode of decarburization and gas afterburning in the EAF is studied.
Research Results. The possibility and efficiency of the CO afterburning by the oxygen beams in the counter gas flow system is experimentally confirmed. This allows accelerate the processes of metal heating and decarburization, as well as improve other technological parameters of the steel electrosmelting.
Discussion and Conclusions. The mathematical modeling results show that a new method of supplying oxygen through the oxyfuel burners and the oxygen lance provides an increase in the energy efficiency of the steel electrosmelting in the electric arc furnace.

Ключевые слова: дуговые сталеплавильные печи, режимы обезуглероживания, дожигание горючих газов

Keywords: electric arc furnaces, decarburization modes, combustible gas afterburning

Введение. Сложность и многофакторность высокотемпературных процессов, своеобразное проявление свойств реагирующих фаз затрудняют изучение и прогнозирование динамики сталеплавильных процессов в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Плавление железорудных металлизованных окатышей (ЖМО) в дуговой сталеплавильной печи сопровождается восстановлением оксидов железа углеродом шихты и кипением ванны.

Для уменьшения длительности плавления и улучшения его показателей большое значение имеет правильный выбор скорости обезуглероживания расплава, влияющей на скорость плавления ЖМО. Эти параметры необходимо совместить с управляемым окислительным рафинированием ванны, т. е. окислением примесей и нагревом металла до

[1] Работа выполнена в рамках ГЗ №11.64.2015.14 (СТИ НИТУ МИСиС).
** E-mail: merker@inbox.ru; Viktor1990_31@mail.ru; lkrakht@mail.ru; akem@dstu.ru
*** The research is done within the frame of the government task no. 11.64.2015.14 (NITU MISiS).

температуры, близкой к температуре выпуска, что способствует существенному ускорению электроплавки при повышении эффективности режимов дожигания горючих газов в ДСП [1, 2].

Экспериментальная часть. Эффективность технологии электроплавки стали в дуговой печи с применением дожигания отходящих газов оценивалась по данным лабораторных и промышленных исследований, с учетом информации, содержащейся в литературных источниках.

В работе рассматривались результаты исследования режима электроплавки ЖМО с учётом дожигания отходящих газов в дуговой сталеплавильной печи и подачи кислорода через кислородную фурму и углеродистого порошка на шлак через топливно-кислородные горелки (ТКГ) [3]. На основе теоретических положений и экспериментальных данных по дожиганию отходящих газов в дуговой печи с учётом особенностей развития окислительных процессов, происходящих в сталеплавильной ванне ДСП, были разработаны методы и алгоритмы системы оценки параметров режимов обезуглероживания и дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи [4].

Кинетика процесса обезуглероживания может быть представлена обобщённым уравнением [5]:

$$-d[C](\tau)/d\tau = -\nu_C, \tag{1}$$

$$\nu_C = \nu_{C1} + \nu_{C2} + \nu_{C3} + \nu_{C4}, \tag{2}$$

где ν_C — обобщённая скорость окисления углерода в ванне дуговой печи при электроплавке ЖМО, %/мин; $\nu_{C1} = (12/16)\cdot\beta_{O_2}\cdot([O]-[O]_{р.с.})\cdot 60\cdot S_{пуз}/(V_{Me}\cdot\xi)$ — скорость окисления углерода в объёме металла на поверхности пузырьков CO, %/мин; $\nu_{C2} = (12/16)\cdot\beta_{O_2}\cdot([O]_{р.ш.}-[O]\cdot 60\cdot S_{ш.м.}/(V_{Me}\cdot\xi)$ — скорость окисления углерода на границе раздела «шлак — металл», %/мин; $\nu_{C3} = \rho_{O_2}\cdot a_{O_2}\cdot x_{O_2}\cdot I_{O_2}\cdot\eta_C\cdot 100/M_{Me}$ — скорость окисления углерода кислородом дутья через ТКГ и кислородную фурму, %/мин; $\nu_{C4} = \nu_{ок}\cdot([C]_{ок}-[C]_{реакц})/M_{Me}$ — скорость поступления углерода (науглероживателя) металла за счёт подачи ЖМО в ванну печи, %/мин; V_{Me} — объём металла в печи, м³; M_{Me} — масса металла в печи, кг; $\beta_{O_2} = 10^{-3}\div 10^{-5}$ — коэффициент массопереноса кислорода; $S_{пуз.}$, $S_{ш.м.}$ — площади поверхности пузырьков CO и поверхности «шлак — металл», м²; $[O]$, $[O]_{р.с.}$, $[O]_{р.ш.}$ — содержание кислорода в металле, равновесное с содержанием углерода в металле и шлаке, %; η_C — доля кислорода, идущая на окисление углерода; $\rho_{O_2} = 1,42\cdot 10^{-3}$ — плотность кислорода, кг/м³; $a_{O_2} = 0,8$ — коэффициент усвоения кислорода ванной для ДСП-150; I_{O_2} — интенсивность подвода технического кислорода, м³/мин; $x_{O_2} = 0,995$ — доля кислорода в дутье; $\nu_{ок}$ — скорость подачи окатышей в печь, кг/мин; $[C]_{ок}$ — содержание углерода в окатышах, %; $[C]_{реакц} = (12/16)[O]_{ок}$ — углерод окатышей, идущий на довосстановление оксидов железа, содержащегося в них, %; $\xi = [1+((10^{-5}\cdot 0,75\cdot p_{CO})/(K_{[C]}\cdot[C]^2))]\cdot[1+((0,22\cdot M_{шл})/(\gamma_{(FeO)}\cdot L_{O_2}\cdot M_{Me}))]$ — коэффициент, учитывающий накопление кислорода в металле; $M_{шл}$ — масса шлака, кг; p_{CO} — внешнее давление на пузырьки CO, Па; L_{O_2} — константа распределения кислорода; $\gamma_{(FeO)}$ — коэффициент активности FeO в шлаке.

Коэффициенты использования кислорода на окисление углерода и железа рассчитываются по уравнениям [6]:

$$\eta_C = \frac{(K/D)_{CO}}{\sum(K/D)_i},\ \eta_{Fe} = \frac{(K/D)_{FeO}}{\sum(K/D)_i}, \tag{3}$$

где K_i/D_i — безразмерная величина, оценивающая отклонение каждой окислительной реакции от равновесия.

Активность оксида железа в окислительном шлаке зависит от его состава и температуры и может быть рассчитана по уравнениям модели регулярного ионного раствора:

$$a_{FeO} = \gamma_{FeO}\cdot x_{FeO}, \tag{4}$$

где x_{FeO} — мольная доля FeO в шлаке; γ_{FeO} — коэффициент активности FeO в шлаке.

Активность кислорода в шлаке рассчитывается по следующей формуле:

$$a_{O_2} = \gamma_{O_2}\cdot x_{O_2}, \tag{5}$$

где x_{O_2} — мольная доля O_2 в шлаке; γ_{O_2} — коэффициент активности O_2 в шлаке.

Определяем коэффициент активности кислорода через логарифм по формуле:

$$\lg f_{O_2} = e_O^O[O] + e_O^C[C], \tag{6}$$

где $e_O^O = -0,17$, $e_O^C = -0,421$ — массовые параметры взаимодействия углерода и кислорода.

Из уравнений (5)–(6) находим содержание кислорода в металле [7]:

$$[O] = a_{O_2} / f_{O_2}. \quad (7)$$

При расчете образования (FeO) в шлаке используем теорию регулярных растворов. Коэффициент распределения кислорода записывается следующим образом:

$$L_{O_2} = 10^{\frac{6320}{T}+0,734}. \quad (8)$$

Содержание кислорода в жидком металле при равновесии его со шлаком ($[O]_{р.ш.}$) зависит от активности оксида железа в шлаке $a_{(FeO)}$, и константы распределения L_O:

$$[O]_{р.ш.} = a_{(FeO)} / L_O. \quad (9)$$

Текущее содержание кислорода в металле в период окислительного рафинирования занимает промежуточное положение между равновесными с углеродом и со шлаком значениями (при этом, чем больше кислорода тратится на обезуглероживание и меньше поступает из шлака, тем ближе текущее значение к равновесному с углеродом). Будем считать, что эти величины отличаются только по разностям концентраций и величинам реакционных поверхностей. Тогда, исходя из закона сохранения масс:

$$([O]_{р.с.} - [O])(S_{пуз} + S_{ш.м.}) + ([O]_{ш.м.} - [O])S_{ш.м.} = 0,$$

откуда получаем

$$[O]_{р.с.} = \frac{[O]\cdot(S_{пуз} + S_{ш.м.}) + [O]_{ш.м.} S_{ш.м.}}{S_{пуз} + 2S_{ш.м.}}. \quad (10)$$

Хотя пузырьки и зарождаются только на подине, реакция $[C] \rightarrow \{CO\}$ протекает по всему объёму металла, причем более энергично этот процесс происходит в верхних его слоях. Последнее обусловлено тем, что при всплывании пузырька непрерывно увеличиваются его объём и поверхность, а по мере снижения ферростатического давления столба металла уменьшается равновесное $[O]_{р.с.}$ и растёт сверхравновесное $[O]-[O]_{р.с.}$ содержание кислорода [8, 9]. Для выяснения механизма образования газовых пузырьков в ванне используем следующий подход. Внешнее давление на пузырьки можно вычислить по формуле:

$$p_{CO} = p_{вн.} = p_{атм.} + \left(H_{ме}\rho_{ме} + H_{шл}\rho_{шл}\right)g, \quad (11)$$

где $p_{атм.}$ — атмосферное давление, Па; $H_{ме}$ — высота слоя металла над пузырьком, м; $H_{шл}$ — высота шлака над пузырьком, м; $\rho_{ме}$ — плотность металла (6600 кг/м^3); $\rho_{шл}$ — плотность шлака (3000 кг/м^3).

Ванна ДСП в упрощенном виде представляет собой усечённый конус, направленный вниз с углом $\alpha = 45°$ и высотой $H_{ван}$. Радиус большего основания конуса равен радиусу ванны печи ($R_{ван}$). Радиус пода равен $R_{под} = R_{ван} - H_{ван} / tn\alpha$. Исходя из объема конуса $V_{Me} = 1/3HS = 1/3H\pi R^2_{ван}$ высоту слоя металла или шлака можно определить из формулы:

$$H_{ван} = \left(\sqrt[3]{3V_{Me} / \left(\pi\cdot tn\alpha\right) + R_{под}} - R_{под}\right)\cdot tn\alpha, \quad (12)$$

где V_{Me} — объем металла в печи, м^3.

Основные параметры пузырька: объём $V_{пуз} = 4/3\pi r^3_{CO}$, полная поверхность $S = 4\pi r^2_{CO}$, r_{CO} — радиус. Радиус пузырька можно рассчитать по формуле [10]:

$$r = \sqrt{2\sigma / (\rho g)}, \quad (13)$$

где σ — поверхностное натяжение расплава, Дж/м^2.

Для определения площади пузырьков используем данные расчетов:

$$S_{пуз} = SN_{пуз}, \quad (14)$$

где $N_{пуз}$ — количество пузырей CO в кипящей ванне печи; S=$S_{зер.ван.}$ — площадь зеркала ванны, м^2.

Одним из основных факторов вспенивания шлака является выделение пузырьков CO. Количество пузырей можно рассчитать по формуле:

$$N_{пуз} = V_{CO,в} / V_{пуз} , \qquad (15)$$

где $V_{CO,в}$ — объём CO в ванне, м^3.

Скорость всплытия пузырьков при этом равна:

$$w_{CO} \approx \sqrt{4/3 r_{CO} g}. \qquad (16)$$

Объем образующегося CO определяем по формуле [11]:

$$V_{CO} = \frac{28/12\left(\nu_C \cdot M_{ме} + v_{ок} \cdot [C]_{реакц}\right)}{60 \cdot 100 \rho_{CO}}. \qquad (17)$$

Скорость нагрева можно определить по текущим значениям температуры и содержания углерода в ванне. Из необходимости оптимального перегрева металла над ликвидусом $\Delta t = 75 \pm 15$ K следует, что $t_{опт} = \Delta t + t_{ликв} = \Delta t + (1539 - 85[C])$, и тогда:

$$v_t = \frac{t_{опт} - t_{Me}}{\tau} = \frac{\Delta t + (1539 - 85[C]) - t_{Me}}{\tau}. \qquad (18)$$

Расход ЖМО на плавку стали находится по следующей формуле:

$$v_{ок} = \frac{Q_\tau - q_{хим} - (M_{Me} c_{Me} + M_{шл} c_{шл}) \nu_t}{c_{ок}(T_{пл} - T_{ок}) + L_{пл} + c_p (T_{Me} - T_{пл})}, \qquad (19)$$

где Q_τ — суммарный тепловой поток на ванну, кВт; $q_{хим}$ — затраты тепла на реакции в ванне, кВт; c_{Me} , $c_{шл}$, $c_{ок}$, c_p — удельные теплоёмкости металла, шлака, окатышей и расплава на поверхностях, Дж/(кг $\cdot$ К); $T_{ок}$, $T_{пл}$, T_{Me} — температуры окатышей, их плавления и температура металла в ванне ДСП, K.

Скорость загрузки извести в ванну можно определить по выражению:

$$\nu_{изв} = (B \cdot (SiO_2)_{ок} - (CaO)_{ок} \cdot \nu_{ок} / 100 + (B \cdot (SiO_2)_0 - (CaO)_0) / (\tau - \tau_0) , \qquad (20)$$

где $(CaO)_{ок}$, $(SiO_2)_{ок}$ — содержание этих оксидов в окатышах, кг; $(CaO)_0$, $(SiO_2)_0$ — начальная масса оксидов в шлаке, кг.

Скорость образования $\Sigma(FeO)$ в шлаке за счет продувки газообразным кислородом находим по формуле:

$$v_{(FeO),1} = 72/16 \rho_{O_2} a_{O_2} x_{O_2} I_{O_2} \eta_{Fe} , \qquad (21)$$

где η_{Fe} — доля кислорода на окисление железа.

Скорость изменения $\Sigma(FeO)$ в шлаке за счёт окисления углерода в ванне печи:

$$v_{(FeO),2} = -72/12 v_C M_{ме} / 100. \qquad (22)$$

При плавлении окатышей происходит довосстановление оксидов железа (FeO), содержащихся в них. В случае, если содержание углерода в окатышах меньше стехиометрического ($C_{ок} < [C]_{реакц}$) часть FeO из окатышей переходит в шлак. Скорость поступления $\Sigma(FeO)$ в шлак за счёт загрузки окатышей:

$$v_{(FeO),3} = v_{ок} 72/16([O]_{ок} - 16/12 C_{ок})/100. \qquad (23)$$

Суммарная скорость образования $\Sigma(FeO)$ в шлаке:

$$v_{(FeO)} = v_{(FeO),1} + v_{(FeO),2} + v_{(FeO),3} . \qquad (24)$$

Объем CO в ванне находим по формуле:

$$V_{CO,в} = V_{CO} \tau_{под} = V_{CO} H_{ван} / w_{CO} . \qquad (25)$$

Тепловой эффект от реакций:

$$q_{v_C} = \left(q_{C,1} v_{C,1} + q_{C,2} v_{C,2} + q_{C,3} v_{C,3} + q_{C,4} v_{C,4}\right) M_{ме} / 100 , \qquad (26)$$

$$q_{\nu_{(FeO)}} = q_{(FeO),1} v_{(FeO),1} + q_{(FeO),2} v_{(FeO),2} , \qquad (27)$$

где q — теплота реакций; $q_{C,1}$ =23,4 кДж/моль для $[C]+[O]\to\{CO\}$; $q_{C,2}$ = –98,6 кДж/моль для $[C]+[FeO]\to[Fe]+\{CO\}$; $q_{C,3}$ =140,6 кДж/моль для $[C]+1/2O_2\to\{CO\}$; $q_{C,4}$ = –22,6 кДж/моль для $C_{ок}\to[C]$; $q_{(FeO),1}$, $[Fe]+1/2O_2\to(FeO)$; $q_{(FeO),2}$, $[Fe]+[O]\leftrightarrow(FeO)$.

Потери тепла с уходящими газами составят:

$$q_{ух,газ} = c_{CO}V_{CO}\rho_{CO}t_{CO}\ , \tag{28}$$

где c_{CO} — теплоемкость уходящих газов, Дж/(кг·К); t_{CO} — температура уходящих газов (принимаем равной температуре металла), °C.

Тогда скорость нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания [12, 13]:

$$v_{t,C} = \frac{q_{v_C} - q_{ух,газ}}{M_{ме}c_{ме} + M_{шл}c_{шл}}. \tag{29}$$

Массовый расход CO (g_{CO} , кг/с) равен:

$$g_{CO} = 0{,}141\cdot M_{Me}\cdot V_C\ /100 \tag{30}$$

Коэффициент дожигания CO (η_{CO} , %) определяется по следующей формуле:

$$\eta_{CO} = \frac{CO_2}{CO + CO_2}\cdot 100\%. \tag{31}$$

Из формул (30) и (31) находим расход кислорода на дожигание CO до CO_2 ($I_{O_2}^{дож}$, м³/мин) по формуле:

$$I_{O_2}^{дож} = 0{,}5\cdot\eta_{CO}\cdot g_{CO}\cdot(22{,}4/12)\cdot(T_{Me}\ /\ 273)\ . \tag{32}$$

При дожигании CO над шлаком потоком O_2, поступающего из ТКГ в патрубке устройства для дожигания CO в ДСП выделяется следующее дополнительное количество тепла ($Q_{CO}^{дож}$, Вт/м²):

$$Q_{CO}^{дож} = \alpha_{ж}\cdot\gamma\cdot(t_{ср(CO)} - t_{шл})\cdot S_{ш.м.}\ , \tag{33}$$

где $\alpha_{ж}$ — усреднённый коэффициент теплоотдачи путём конвекции и излучения, Вт/(м² · °C); $t_{ср(CO)}$ и $t_{шл}$ — температуры соответственно поверхности факела дожигания CO и шлака, °C; $S_{ш.м.}$ — поверхность теплоотдачи, м²; $\gamma = 50\div75\%$ — коэффициент, характеризующий долю тепла от дожигания CO, поступающего на нагрев шлаковой ванны.

На основе рассмотренных положений разработан алгоритм системы оценки параметров режима дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи. Схема данного алгоритма представлена на рис. 1. Уравнения, представленные выше, решались численно на ЭВМ с помощью компьютерной программы *MATLAB*.

Изначально были заданы исходные данные: температура, масса и состав металла и шлака, интенсивность подачи кислорода дутья, теплофизические параметры и тепловые эффекты рассчитываемых реакций (блок 1).

Из текущей температуры определяются константы реакций и коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком (блок 2). Полученные данные используются для расчёта равновесных содержаний кислорода в металле. Далее определяется скорость нагрева по текущим значениям температуры и содержания углерода в ванне, затем рассчитывается скорость загрузки окатышей и извести, скорость окисления углерода в ванне дуговой печи при электроплавке ЖМО, объём образующегося CO (блок 3). Определяется первое приближение величин поверхностей «шлак — металл» и пузырей в ванне.

Исходя из равновесных содержаний кислорода и реакционных поверхностей рассчитываются параметры пузырька CO (блок 4) и объём выделившегося из ванны газа (блок 5). Если разница заданных и рассчитанных поверхностей больше заданной погрешности, то расчёт обезуглероживания повторяется. Когда погрешность удовлетворяет заданным условиям, то сначала рассчитываются скорости поступления (FeO) в шлак (блок 6), а затем скорость нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания металла в ДСП (блок 7).

Далее осуществляется расчёт коэффициента дожигания CO (η_{CO}), массового расхода CO (g_{CO}), интенсивности продувки при дожигании ($I_{O_{2дож}}$) и количества тепла, выделяемого при дожигании ($Q_{CO}^{дож}$), представленных в блоке 8. Если текущее время меньше времени расчёта, то переходим к расчёту следующего промежутка времени, иначе выводим конечные данные (блок 9).

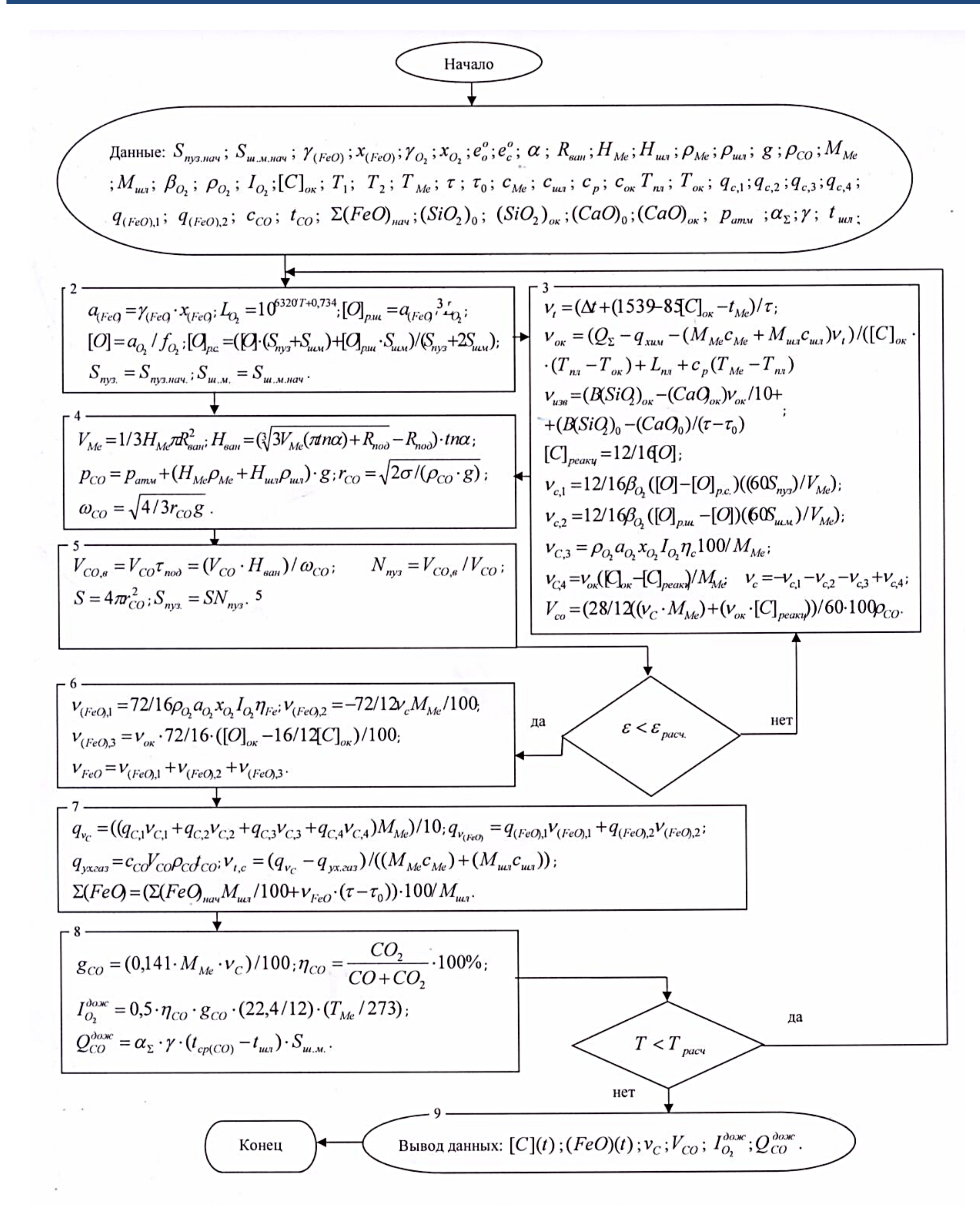


Рис. 1. Алгоритм системы оценки параметров режимов обезуглероживания и дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи

Fig. 1. Algorithm of parameter estimation system of decarburization and combustible gas afterburning modes in electric arc furnace

На рис. 2 приведены графики зависимостей системы оценки параметров режимов обезуглероживания и дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи.

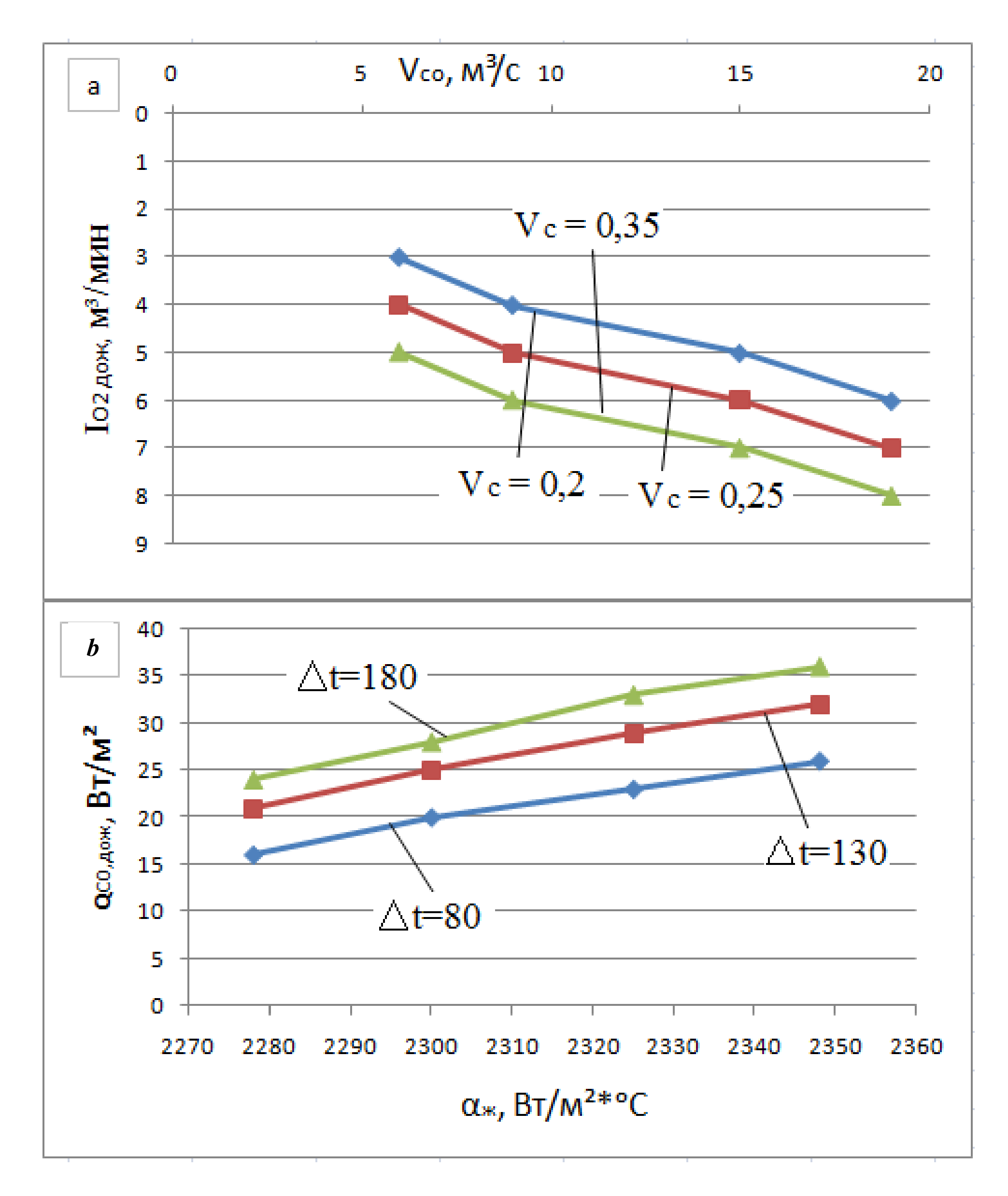


Рис. 2. Графики зависимостей:

a) расхода кислорода на дожигание *CO* до CO_2 ($I_{O_2}^{дож}$, м³/мин) от объёма *CO* (V_{CO} , м³/с) при различных скоростях окисления углерода (ν_C = 0,2; 0,25; 0,35 %/мин);

b) количества тепла, выделяемого при дожигании ($Q_{CO}^{дож}$, Вт/м²) от коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{ж}$, Вт/м² · °С) при разности температур поверхности факела дожигания *CO* и шлака (Δt = 80; 130; 180 °С)

Fig. 2. Dependency graphs:

a) oxygen consumption for afterburning of *CO* to CO_2 ($I_{O_2}^{дож}$ m³ / min) of *CO* volume (V_{CO} m³ / s) at various carbon oxidation rates (ν_C = 0.2; 0.25; 0.35% / min);

b) amount of heat released under afterburning ($Q_{CO}^{дож}$, W / m²) of the heat transfer coefficient ($\alpha_{ж}$,W / m² °C) at the temperature differential of *CO* and slag afterburning flame area(Δt = 80; 130; 180 °C)

Из рис. 2, *a* видно, что при увеличении объёма *CO* (V_{CO} , м³/с), выделяющегося из ванны ДСП, повышается расход кислорода на дожигание *CO* до CO_2 ($I_{O_2}^{дож}$, м³/мин) при увеличении скоростей окисления углерода (ν_C , %/мин). Из рис. 2, *b* следует, что теплотехнические параметры ($Q_{CO}^{дож}$ и $\alpha_{ж}$) возрастают, а это объясняется тем, что струи дожигания при передаче тепла шлаку и металлу вызывают интенсивное перемешивание сталеплавильной ванны в дуговой сталеплавильной печи.

Выводы. Рассмотрены кинетические особенности электроплавки стали в дуговой сталеплавильной печи. Разработаны методы и алгоритмы системы оценки параметров режимов обезуглероживания и дожигания горючих газов в

ДСП, позволяющие организовать эффективное перемешивание дожигаемых газов с подаваемым в печь кислородом и реализовать эффективную передачу тепла сталеплавильной ванне.

Библиографический список.

1. Гудим, Ю. А. Способы интенсификации плавки в дуговых печах / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д., Киселев, А. М. Шумаков // Электрометаллургия. — 2005. — № 9. — С. 2–6.

2. Киселёв, А. Ю. Эффективность применения газокислородных горелок в современных дуговых сталеплавильных печах / А. Ю. Киселёв, И. Ю. Зинуров, Д. Н. Макаров, Ю. Ф. Маменко, С. Н. Пигин // Металлург. — 2006. — № 10. — С. 60–62.

3. Копцев, В. В. Физическое моделирование аэродинамики сопла горелочного устройства с центральным телом / В. В. Копцев, О. В. Казаков, В. Н. Горбулин // Металлург. — 2007. — № 8. — С. 81–82.

4. Дуговая сталеплавильная печь с дожиганием горючих газов : патент Рос. Федерация : Э. Э. Меркер, Г. А. Карпенко, И. В. Моисеев. — № 2520883; опубл. 27.06.14, Бюл. № 18. — 3 с.

5. Кочнов, М. Ю. Повышение эффективности дожигания и охлаждения технологических газов крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей / М. Ю. Кочнов, Л. А. Шульц, Ю. М. Кочнов // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. — 2009. — № 11. — С. 49–55.

6. Металлизованные железорудные окатыши и повышение эффективности их применения при электроплавке стали в дуговой печи / Л. Н. Крахт [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — № 3. — С. 35–40.

7. Способ дожигания и обеспыливания отходящих газов электродуговых сталеплавильных печей : патент Рос. Федерация : В. И. Лисиенко, А. Л. Засухин. — №2451092; опубл. 01.09.10, Бюл. № 11. — 3 с.

8. Меркер, Э. Э. Математическая модель обезуглероживания металла при электроплавке железорудных окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, Е. А. Черменев // Сталь. — № 3. — 2014. — С. 28–33.

9. Падерин, С. Н. Термодинамика и расчёты процесса глубокого обезуглероживания стали / С. Н. Падерин, Е. П. Падерин // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. — 2005. — № 10. — С. 19–24.

10. Падерин, С. Н. Термодинамическое моделирование окислительных процессов при обезуглероживании стали / С. Н. Падерин, П. С. Падерин, И. В. Кузьмин // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. — 2003. — № 5. — С. 6–11.

11. Исследование эффективности электроплавки окатышей в дуговой печи при дожигании оксида углерода топливно-кислородными горелками / В. А. Степанов [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 2. — С. 97–104.

12. Logar, V. Mathematical modeling and experimental validation of an electric arc furnace / D. Dovzan, I. Skrjanc // ISIJ International. — 2011. — Vol. 51. — No. 3. —P. 382–391.

13. Brooks, G. Optimizing chemical energy into Electric Arc Furnaces / [et al.] // SEAISI Quaterly. — 2012. — No. 4. — P. 17–22.

References

1. Gudim, Yu.A., Zinurov, I.Yu., Kiselev, A.D., Shumakov, A.M. Sposoby intensifikatsii plavki v dugovykh pechakh. [Rational methods of intensification of electric smelting in modern arc steelmaking furnaces.] Elektrometallurgiya, 2005, no. 9, pp. 2–6 (in Russian).

2. Kiselev, A.Y., Zinurov, I.Yu., Makarov, D.N., Mamenko, Y.F., Pigin, S.N. Effektivnost' primeneniya gazokislorodnykh gorelok v sovremennykh dugovykh staleplavil'nykh pechakh. [Effectiveness of use of gas-oxygen burners in modern steelmaking EAF.] Metallurgist*,* 2006, no. 10, pp. 60–62 (in Russian).

3. Koptsev, V.V., Kazakov, O.V., Gorbulin, V.N. Fizicheskoe modelirovanie aerodinamiki sopla gorelochnogo ustroystva s tsentral'nym telom. [Physical modeling of jet aerodynamics for burner with central body.] Metallurgist*,* 2007, no. 8, pp. 81–82 (in Russian).

4. Merker, E.E., Karpenko, G.A., Moiseev, I.V. Dugovaya staleplavil'naya pech' s dozhiganiem goryuchikh gazov: patent Ros. Federatsiya. [Arc steel-making furnace with afterburning of combustion gases.] Patent RF, no. 2520883, 2014 (in Russian).

5. Kochnov, M.Y., Schulz, L.A., Kochnov, Y.M. Povyshenie effektivnosti dozhiganiya i okhlazhdeniya tekhnologicheskikh gazov krupnotonnazhnykh dugovykh staleplavil'nykh pechey. [Increase in efficiency of afterburning and cooling of technological gases of large-capacity arc steel-smelting furnaces.] Izvestia. Ferrous Metallurgy. 2009, no. 11, pp. 49–55 (in Russian).

6. Krakht, L.N., at el. Metallizovannye zhelezorudnye okatyshi i povyshenie effektivnosti ikh primeneniya pri elektroplavke stali v dugovoy pechi. [Impact of using metallized iron ore pellets to increase the efficiency of electric arc furnace.] Vestnik of DSTU, 2015, no. 3, pp. 35–40 (in Russian).

7. Lisienko, V.I., Zasukhin, A.L. Sposob dozhiganiya i obespylivaniya otkhodyashchikh gazov elektrodugovykh staleplavil'nykh pechey: patent Ros. Federatsiya. [Method of afterburning and dedusting exhaust gases of electric arc steelmaking furnaces.] Patent RF, no. 2451092, 2010 (in Russian).

8. Merker, E.E., Chermenev, E.A. Matematicheskaya model' obezuglerozhivaniya metalla pri elektroplavke zhelezorudnykh okatyshey v dugovoy pechi. [The mathematical model of metal decarbonizing in electric melting of iron ore pellets in the EAF.] Steel, 2014, no. 3, pp. 28–33 (in Russian).

9. Paderin, S.N., Paderin, E.P. Termodinamika i raschety protsessa glubokogo obezuglerozhivaniya stali. [Thermodynamics and calculations of deep steel decarburization process.] Izvestia. Ferrous Metallurgy. 2005, no. 10, pp. 19–24 (in Russian).

10. Paderin, S.N., Paderin, P.S., Kuzmin, I.V. Termodinamicheskoe modelirovanie okislitel'nykh protsessov pri obezuglerozhivanii stali. [Thermodynamic simulation of oxidation processes during decarburization of steel.] Izvestia. Ferrous Metallurgy. 2003, no. 5, pp. 6–11 (in Russian).

11. Stepanov, V.A., et al. Issledovanie effektivnosti elektroplavki okatyshey v dugovoy pechi pri dozhiganii oksida ugleroda toplivno-kislorodnymi gorelkami. [Research of pellet electrosmelting efficiency in arc furnace under the carbon oxide post-combustion by fuel oxygen burners.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 2, pp. 97–104 (in Russian).

12. Logar, V., Dovzan, D., Skrjanc, I. Mathematical modeling and experimental validation of an electric arc furnace. ISIJ International, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 382–391.

13. Brooks, G., et al. Optimizing chemical energy into Electric Arc Furnaces. SEAISI Quaterly, 2012, no. 4, pp. 17–22.

Поступила в редакцию 03.02.2017
Сдана в редакцию 03.02.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 03.02.2017
Submitted 03.02.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Меркер Эдуард Эдгарович,
декан факультета «Металлургические и машиностроительные технологии», заведующий кафедрой «Металлургия и металловедение», Старооскольского технологического института научно-исследовательского технологического университета "МИСиС" (РФ, 309516, Белгородская бласть, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко д. 42), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3201-6747
merker@inbox.ru

Степанов Виктор Александрович,
инженер Старооскольского технологического института научно-исследовательского технологического университета "МИСиС" (РФ, 309516, Белгородская область, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко д. 42)
Viktor1990_31@mail.ru

Крахт Людмила Николаевна,
зав. кафедрой химии и физики Старооскольского технологического института научно-исследовательского технологического университета "МИСиС" (РФ, 309516, Белгородская область, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко д. 42), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4126-4446
lkrakht@mail.ru

Кем Александр Юрьевич,
заведующий кафедрой «Технология конструкционных материалов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5965-914X
akem@donstu.ru

Authors:

Merker, Eduard E.,
Dean of the Metallurgical and Engineering Technologies Faculty, Head of the Metallurgical Engineering and Metal Science Department, Stary Oskol Technological Institute, “MISiS” branch (RF, 309516, Belgorod Region, Stary Oskol, mkr. Makarenko, 42), Dr. Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3201-6747
merker@inbox.ru

Stepanov, Victor A.,
engineer, Stary Oskol Technological Institute, “MISiS” branch (RF, 309516, Belgorod Region, Stary Oskol, mkr. Makarenko, 42),
Viktor1990_31@mail.ru

Krakht, Lyudmila N.,
Head of the Chemistry and Physics Department, Stary Oskol Technological Institute, “MISiS” branch (RF, 309516, Belgorod Region, Stary Oskol, mkr. Makarenko, 42), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4126-4446
lkrakht@mail.ru

Kem, Alexander Yu.,
Head of the Construction Materials Engineering Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5965-914X
akem@donstu.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631/635 10.23947/1992-5980-2017-17-2-108-115

Влияние параметров молотильно-сепарирующего устройства на обмолот*

И. Р. Антибас[1], Т. П. Савостина[2], И. Саед Бакир [3]**

[1, 2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[3] Университет Алеппо, г. Алеппо, Сирийская Арабская Республика

Effect of threshing-separating device parameters on threshing***

I. R. Antypas[1], T. P. Savostina[2], I. Saed Bakir [3]**

[1, 2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[3] University of Aleppo, Aleppo, Syria

Введение. Для создания перспективных высокопроизводительных зерноуборочных комбайнов необходимо руководствоваться техническими принципами и решениями, позволяющими улучшить качественные показатели процессов обмолота и сепарации зерна. Засоренность хлебной массы является фактором, усложняющим обмолот. Для оптимизации обмолота целесообразно корректировать параметры молотильно-сепарирующего устройства, определять закономерности сепарации зерна и его засоренности в зависимости от влажности, изменения подачи хлебной массы, размера молотильного зазора и частоты вращения барабана.

Материалы исследования. Эксперименты проводились на обмолоте озимой пшеницы сорта Донская полукарликовая. Использовалась лабораторно-полевая молотильная установка. В ходе опытов исследовалась сепарирующая способность молотильно-сепарирующего устройства тангенциально-аксиального типа, по форме представляющего собой однополостной гиперболоид вращения.

Результаты исследования. По результатам экспериментов построены графики сепарации и засоренности обмолачиваемого материала в зависимости от подачи хлебной массы, величины молотильного зазора, влажности обмолачиваемой массы и частоты вращения молотильного барабана.

Обсуждение и заключения. В результате исследований подтверждено значительное влияние рабочих параметров молотилки на качественные показатели и уровень потерь зерна при обмолоте.

Introduction. Promising modern high-performance combine harvesters should be created on the basis of new principles and solutions for improving the quality of the threshing and grain separation processes in field operations. Grain infestation is a factor complicating threshing. To optimize threshing, it is advisable to adjust the threshing-separating device parameters, to determine the grain separation and its contamination regularities due to humidity, changes in the grain feeding, the threshing gap dimension and the drum rotation frequency.

Materials and Methods. The experiments were carried out on the threshing of winter wheat of the Don semi-dwarf variety. A laboratory-field threshing apparatus was used. In the course of the experiments, the separating property of the threshing-separating device of a tangential-axial type in the form of a one-nappe revolution hyperboloid was studied.

Research Results. Based on the results of the experiments, the charts of the threshed material separation and clogging depending on the grain feeding, the threshing clearance, the humidity of the threshed mass and the drum rotational speed are plotted.

Discussion and Conclusions. As a result of the studies, a significant effect of the working parameters of the thresher on the quality factors and the level of grain losses in threshing is proved.

Ключевые слова: молотильно-сепарирующее устройство, подача хлебной массы, скорость барабана, величина молотильного зазора, недомолот, сепарация, засоренность, влажность, равномерность.

Keywords: threshing-separating device, grain feeding, drum speed, threshing gap dimension, return, separation, infestation, humidity, uniformity.

Введение. С целью повышения производительности труда в сельском хозяйстве разрабатываются технологии производства и машины, обеспечивающие минимальные затраты энергии и снижение потерь. При создании перспективных высокопроизводительных зерноуборочных комбайнов необходимо руководствоваться техническими принципами и решениями, позволяющими улучшить качественные показатели процессов обмолота и сепарации зерна. Одно из таких прогрессивных решений — молотильно-сепарирующее устройство,

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: imad.antypas@mail.ru, kovtanya@yandex.ru, Imad12sb@gmail.com

***The research is don within the frame of the independent R&D.

имеющее форму однополостного гиперболоида вращения с тангенциально-аксиальной подачей хлебной массы [1]. В данном случае подача в молотильный барабан осуществляется тангенциально, а движение хлебной массы по подбарабанью направлено вдоль оси барабана [2].

Цель исследования. Исследовалось влияние изменения параметров молотильно-сепарирующего устройства тангенциально-аксиального типа, выполненного по форме однополостного гиперболоида вращения. Критериями оценки качественных показателей обмолота были рабочие характеристики: подача хлебной массы, частота вращения барабана, величина молотильного зазора и влажности.

Используемые материалы и установка. Эксперименты проводились на обмолоте озимой пшеницы сорта Донская полукарликовая, широко представленной в севооборотах страны. Использовалась лабораторно-полевая молотильная установка, которая состоит из молотильного устройства тангенциально-аксиального типа, которое обмолачивает хлебную массу, и сепарирующего устройства для отделения и очистки зерна.

Результаты и обсуждение. Качество работы молотильно-сепарирующего устройства оценивали коэффициентами засоренности и сепарации зерна, поступающего на очистку. Коэффициент засоренности определялся как отношение массы сорных примесей к массе зерна, поступающего на очистку. Коэффициент сепарации представляет собой отношение массы зерна, не вымолоченного из колоса, к зерну, выделенному из обмолачиваемой массы в молотилке.

Анализ экспериментальных данных (рис. 1) позволяет утверждать, что суммарная сепарация зерна молотилкой имеет тенденцию к уменьшению при увеличении подачи хлебной массы на обмолот [3].

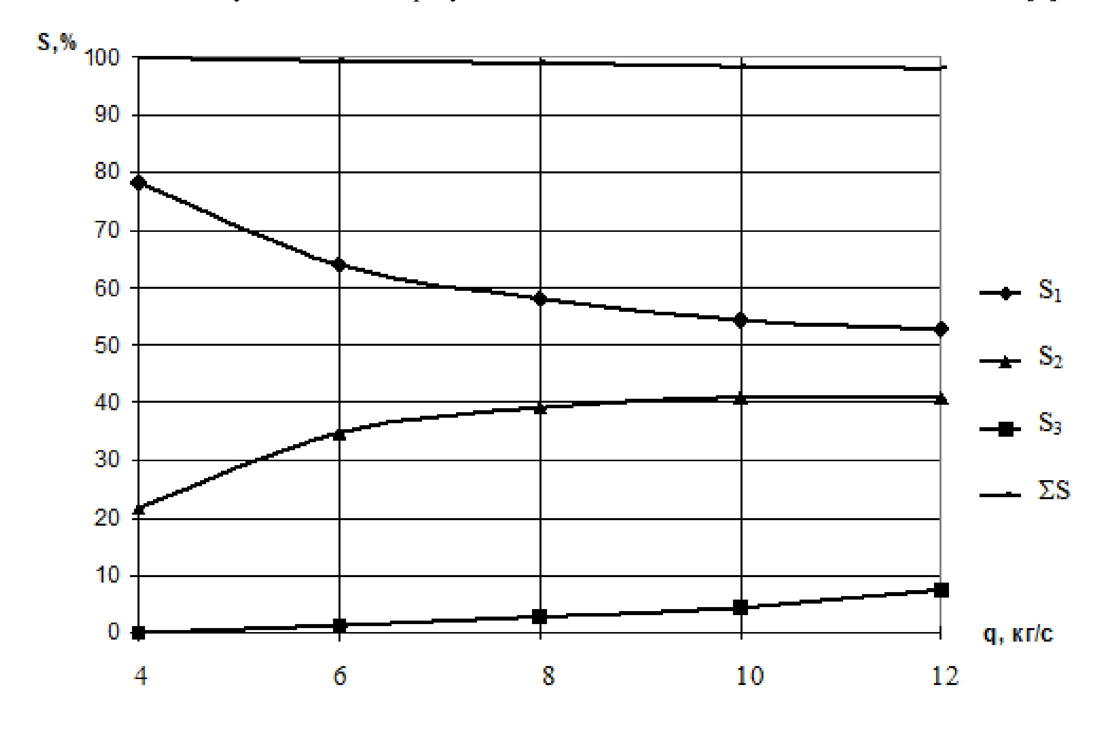


Рис. 1. Сепарация зерна в зависимости от подачи хлебной массы: ΣS — суммарная; S_1, S_2, S_3 — по зонам

Fig. 1. Grain separation depending on bread mass feeding: ΣS - total; S_1, S_2, S_3 - zonally

Изменение величины подачи хлебной массы незначительно влияет на суммарную сепарирующую способность. Так, при увеличении подачи (с 4 до 12 кг/с) сепарация зерна снижается с 99,997 % до 95 % [4]. Из рис. 1 видно, что при малой величине подачи сепарируется большая часть зерна, чем при высокой. Это объясняется тем, что хлебная масса дольше находится под действием бичей. Также из рис. 1 видно, что основная масса сепарируется в первых двух зонах [5].

Экспериментальными исследованиями установлено, что большое содержание мелкого вороха соломы в хлебной массе ухудшает работу очистки, которая сепарируется на малых секундных подачах. Из рис. 2 видно, что при подаче хлебной массы 4 кг/с суммарное содержание незерновых примесей составляет 63,55 %, а увеличение подачи приводит к уменьшению соломистых примесей на очистке.

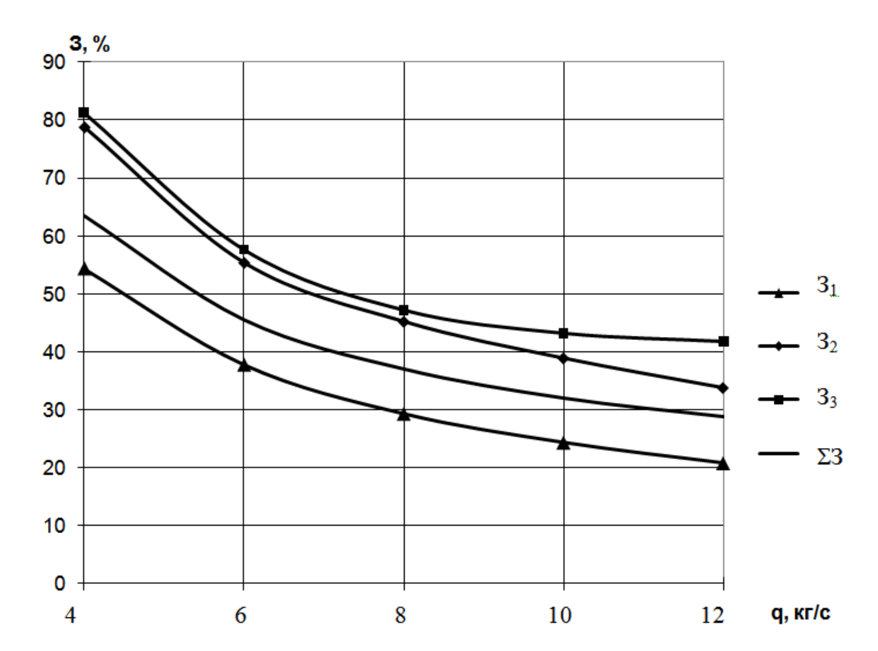


Рис. 2. Засоренность зерна, сепарируемого молотилкой, в зависимости от подачи хлебной массы: ΣЗ — суммарная; $З_1$, $З_2$, $З_3$ — по зонам

Fig. 2. Infestation of grain separated by a thresher depending on grain feeding: ΣЗ - total; $З_1$, $З_2$, $З_3$ - zonally

Это связано с тем, что обмолачиваемая масса в молотильном канале проходит плотным слоем и затрудняет выделение легких примесей [6].

Одним из важных технических параметров молотильно-сепарирующего устройства при обмолоте является величина молотильного зазора. В нашем случае зазор изменялся в диапазоне от 20 до 40 мм (рис. 3).

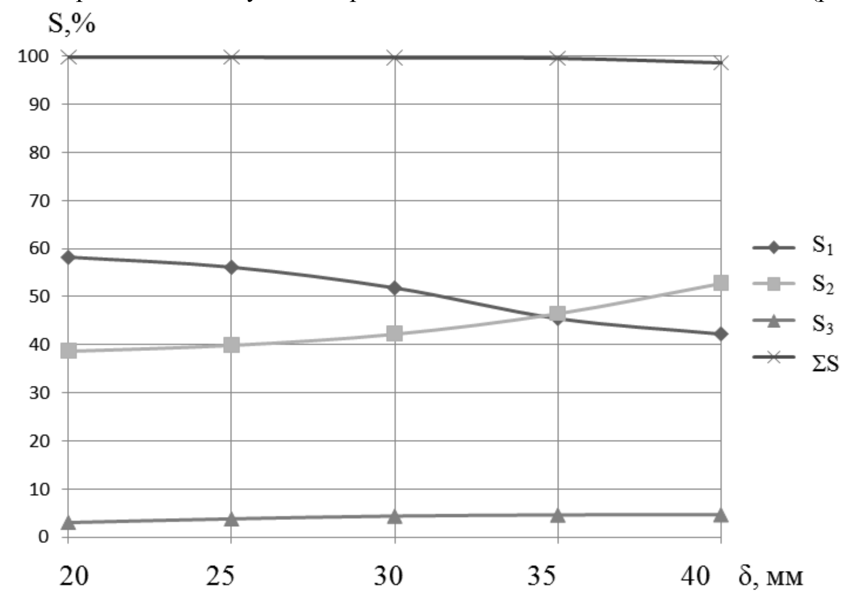


Рис. 3. Сепарация зерна в зависимости от величины молотильного зазора: ΣS — суммарная; S_1, S_2, S_3 — по зонам

Fig. 3. Grain separation depending on threshing gap dimension: ΣS - total; S_1, S_2, S_3 - zonally

При малых (20–25 мм) зазорах интенсивность обмолота больше в первой и второй зоне. Однако при уменьшении молотильного зазора отмечается более значительное повреждение зерна и сильнее измельчается солома, что увеличивает засоренность [7]. С увеличением молотильного зазора до 40 мм суммарная сепарация зерна незначительно уменьшается, сепарация второй и третьей зоны увеличивается. Сепарация первой зоны уменьшается в 1,5 раза (если сравнивать с испытаниями при величине зазора в 20 мм). Это объясняется тем, что увеличение зазора ухудшает воздействие рабочих органов молотилки на обмолачиваемый материал в первой зоне. Итак, в результате увеличения молотильного зазора уменьшается суммарная сепарация зерна, а интенсивность сепарации молотилкой, как и при увеличении подачи, смещается к третьей зоне.

Суммарная засоренность незначительно уменьшается при увеличении молотильного зазора в 2 раза (рис. 4), так как при этом снижается интенсивность воздействия рабочих органов молотилки на материал.

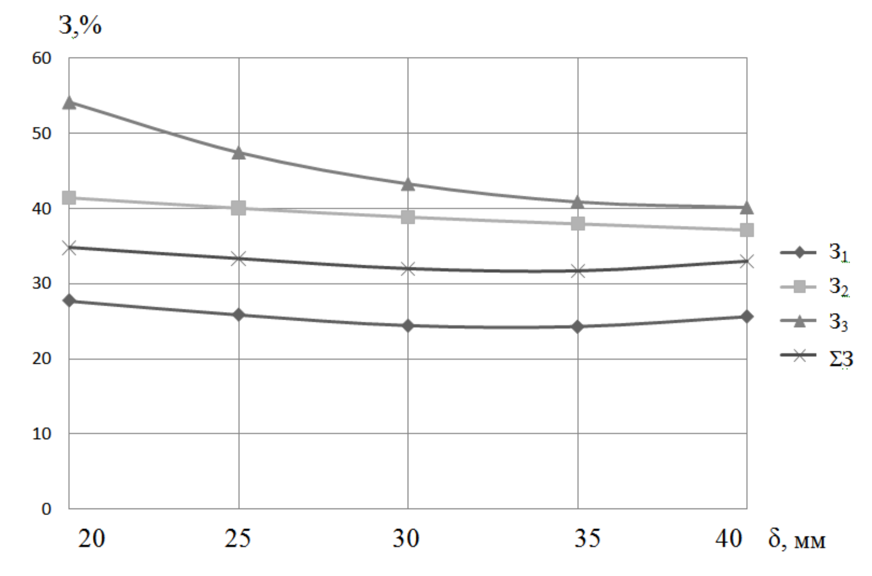


Рис. 4. Засоренность зерна, сепарируемого молотилкой, в зависимости от величины молотильного зазора: ΣЗ — суммарная; $З_1$, $З_2$, $З_3$ — по зонам

Fig. 4. Infestation of grain separated by a thresher depending on threshing gap dimension: ΣЗ - total; $З_1$, $З_2$, $З_3$ - zonally

Основная масса сорных примесей выделяется в третьей зоне, поскольку в первой зоне обмолачиваемая масса идет плотным слоем и практически не изменяется при изменении величины молотильного зазора.

При изменении влажности обмолачиваемого материала с 8 до 24 % суммарная сепарация зерна уменьшается незначительно — с 99,9 % до 97,5 % (рис. 5).

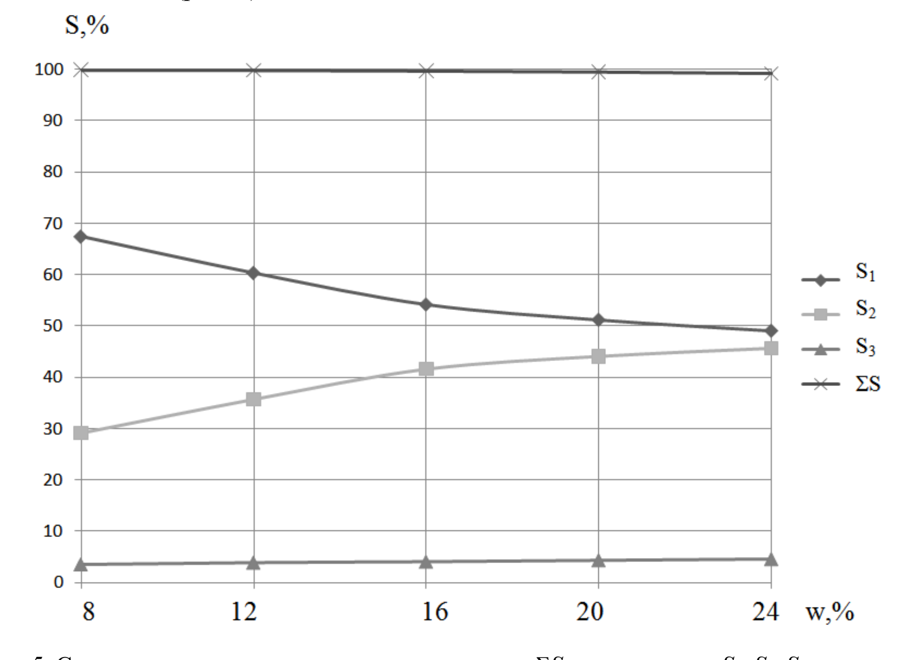


Рис. 5. Сепарация зерна в зависимости от влажности: ΣS — суммарная; S_1, S_2, S_3 — по зонам

Fig. 5. Grain separation depending on humidity: ΣS - total; S_1, S_2, S_3 - zonally

В данном случае обмолачиваемый материал проходит больший путь в молотильном канале и получает достаточное количество ударных воздействий рабочими органами, что разрушает связь зерна с колосом даже при повышенной влажности материала. Сепарация в первой зоне снижается с 68 % до 49 %, так как труднее разрушить связь между зерном и колосом [8]. Во второй зоне при увеличении влажности сепарация увеличивается с 30 % до 45 %, так как при движении по каналу обмолачиваемая масса продолжает получать ударные воздействия, приводящие к разрушению связи зерна с колосом. В третьей зоне изменение величины влажности не влияет на сепарацию.

С увеличением влажности ухудшается вымолачивающая способность в первых зонах, интенсивность вымолота растет к третьей зоне [9]. При увеличении влажности суммарная засоренность зерна уменьшается с 59 % до 15 % (рис. 6).

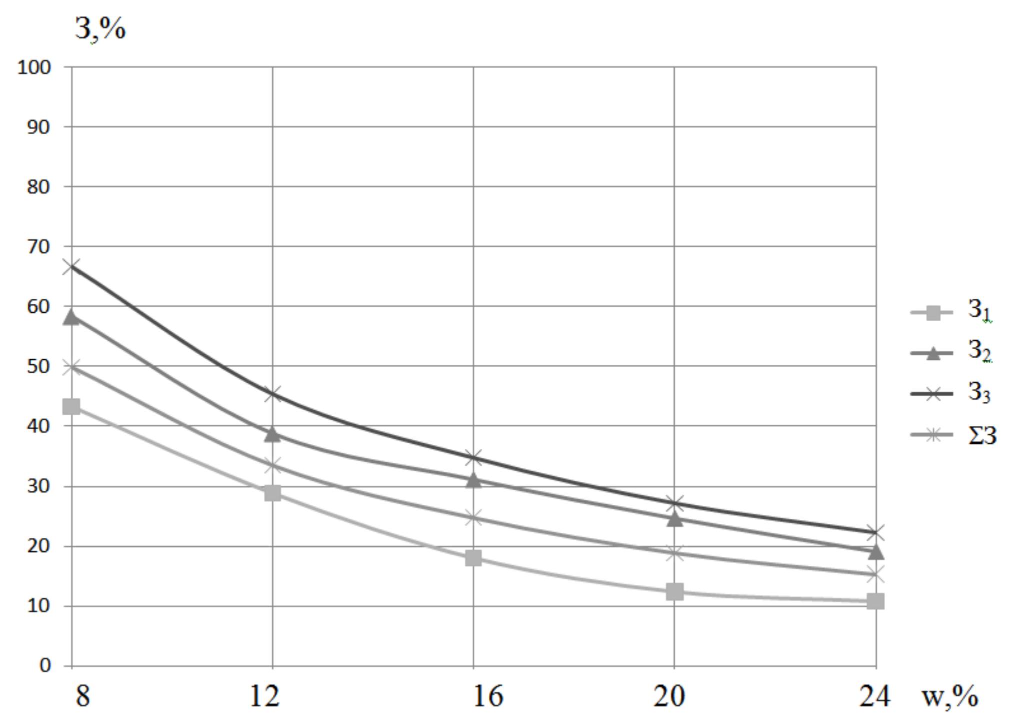


Рис. 6. Засоренность зерна, сепарируемого молотилкой, в зависимости от влажности: ΣЗ — суммарная; $З_1$, $З_2$, $З_3$ — по зонам

Fig. 6. Infestation of grain separated by a thresher depending on humidity: ΣЗ - total; $З_1$, $З_2$, $З_3$ - zonally

Связано это с тем, что при низкой влажности увеличивается измельчение соломы и ее выделение через решетчатую деку. Исследования влияния частоты вращения молотильного барабана показали, что незначительно возрастает суммарная сепарация зерна (рис. 7). Сепарация по зонам практически не отличается при изменении частоты вращения молотильного барабана [10].

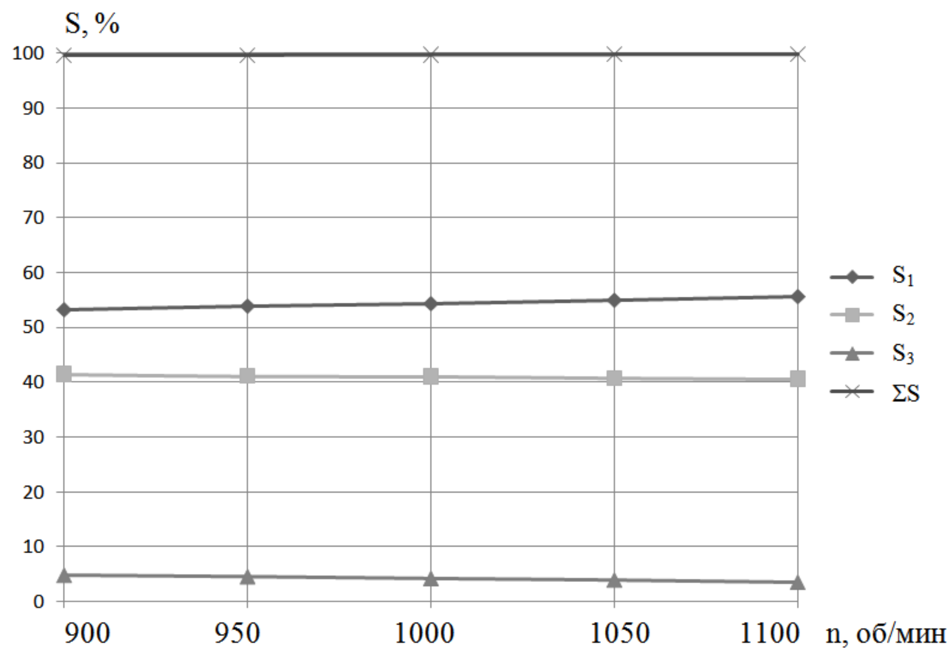


Рис. 7. Сепарация зерна в зависимости от частоты вращения молотильного барабана: ΣS — суммарная; S_1, S_2, S_3 — по зонам

Fig. 7. Grain separation depending on drum rotational speed: ΣS - total; S_1, S_2, S_3 - zonally

Однако увеличение частоты вращения молотильного барабана с 900 до 1100 об/мин приводит к увеличению дробления зерна и росту объема мелких примесей соломы. На рис. 8 видно, что засоренность зерна возрастает при увеличении частоты вращения.

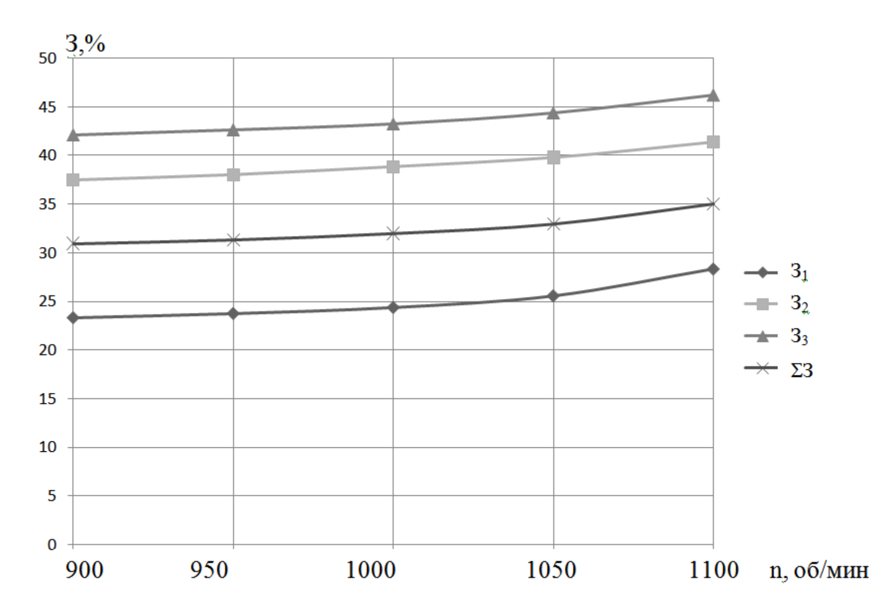


Рис. 8. Засоренность зерна, сепарируемого молотилкой, в зависимости от частоты вращения молотильного барабана: ΣЗ — суммарная; $З_1$, $З_2$, $З_3$ — по зонам

Fig. 6. Infestation of grain separated by a thresher depending on drum rotational speed: ΣЗ - total; $З_1$, $З_2$, $З_3$ - zonally

Это объясняется интенсивным взаимодействием обмолачиваемого материала с бичами, что приводит к разрушению стеблей и увеличивает засоренность зерна.

Выводы.

1. В результате исследований подтверждено, что на качественные показатели и уровень потерь зерна при обмолоте активно влияют рабочие параметры молотилки: частота вращения барабана, подача хлебной массы, величина молотильного зазора и влажность зерна.
2. Увеличение подачи обмолачиваемого материала выше оптимальной приводит к резкому росту недомолота и большим потерям зерна.
3. При увеличении молотильного зазора ухудшается воздействие рабочих органов молотилки на хлебную массу.
4. С увеличением влажности хлебной массы интенсивность вымолота и сепарации зерна переносится ближе к третьей зоне. При низкой частоте вращения барабана возрастает недомолот, а при высокой увеличивается дробление и повреждение зерен.

Библиографический список

1. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration-water content relationships in tillage research / D.-R. Lapen [et al.] // Soil & Tillage Research. — 2003. — № 58. — P. 193–206.

2. Salloum, W. Design of Penetrometer Cone for Measuring Soil Penetration Resistance and Determine Soil Porosity / W. Salloum, H. Bahlawan // Research Journal of Aleppo University. — 2009. — № 76. — P. 40–57.

3. Антибас, И.-Р. Исследование процесса обмолота тангенциально-аксиальным сепарирующим устройством в зависимости от распределения зерновой массы по зонам / И.-Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Научное обозрение. — 2016. — № 23. — С. 87–91.

4. Дьяченко, А. Г. Обеспечение равномерности зерновой массы при обмолоте тангенциально-аксиальным молотильно-сепарирующим устройством / А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону, 2017. — С. 41–43.

5. Антибас, И.-Р. Влияние секундной подачи на процесс обмолота тангенциально-аксиальным молотильно-сепарирующим устройством / И.-Р. Антибас, Т. П. Савостина // Научное обозрение. — 2017.— № 3. — С. 47–51.

6. Kharmanda, G. Reliability-based design optimization strategy for soil tillage equipment considering soil parameter uncertainty / G. Kharmanda, I. Antypas // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 2 (85). — С. 136–147.

7. Kharmanda, G. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design / G. Kharmanda, I. Antypas // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 2 (81). — С. 22–31.

8. Антибас, И.-Р. Технические параметры модифицированной сеялки для высева зерновых культур в тяжелые по механическому составу почвы / И.-Р. Антибас, А. Г. Дьяченко// Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 3 (82). — С. 81–88.

9. Antibas, I.-R. Evaluation of soil force of resistance to penetration with the use of new design of penetrometer's probe tip / I.-R. Antibas, A. G. Dyachenko // International Journal of Environmental and Science Education. — 2016. — Vol. 11, № 18. — P. 10941–10950.

10. Антибас, И.-Р. Использование метода подачи воздуха под давлением в почву для определения силы сопротивления проникновению при различной влажности / И.-Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 4 (87). — С. 155–163.

References

1. Lapen, D.-R., et al. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration-water content relationships in tillage research. Soil & Tillage Research, 2003, no. 58, pp. 193–206.

2. Salloum, W., Bahlawan, H.. Design of Penetrometer Cone for Measuring Soil Penetration Resistance and Determine Soil Porosity. Research Journal of Aleppo University, 2009, no. 76, pp. 40–57.

3. Antipas, I.-R., Dyachenko, A.G., Savostina, T.P. Issledovanie protsessa obmolota tangentsial'no-aksial'nym separiruyushchim ustroystvom v zavisimosti ot raspredeleniya zernovoy massy po zonam. [Study on threshing process by a tangental-axial separating device depending on the zonal distribution of the grain mass.] Science Review, 2016, no. 23, pp. 87–91 (in Russian).

4. Dyachenko, A.G., Savostina, T.P. Obespechenie ravnomernosti zernovoy massy pri obmolote tangentsial'no-aksial'nym molotil'no-separiruyushchim ustroystvom. [Uniformity control of the grain mass under threshing by a tangental-axial threshing-separating device.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya : sb. statey 10-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 20-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2017». [State and prospects of development of agricultural machinery: Proc. 10th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of 20-th agroindustrial exhibition "Interagromash-2017".] Rostov-on-Don, 2017, pp. 41–43 (in Russian).

5. Antipas, I.-R., Savostina, T.P. Vliyanie sekundnoy podachi na protsess obmolota tangentsial'no-aksial'nym molotil-'no-separiruyushchim ustroystvom. [Impact of second feed for the threshing process of the tangential-axial breaking unit.] Science Review, 2017, no. 3, pp. 47–51 (in Russian).

6. Kharmanda, G., Antipas, I. Reliability-based design optimization strategy for soil tillage equipment considering soil parameter uncertainty. Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 2 (85), pp. 136–147.

7. Kharmanda, G., Antipas, I. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design. Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 2 (81), pp. 22–31.

8. Antipas, I.-R., Dyachenko, A.G. Tekhnicheskie parametry modifitsirovannoy seyalki dlya vyseva zernovykh kul'tur v tyazhelye po mekhanicheskomu sostavu pochvy. [Technical parameters of modified seed drill for sowing grain crops in heavy soils.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 3 (82), pp. 81–8 (in Russian).

9. Antipas, I.-R., Dyachenko, A.G. Evaluation of soil force of resistance to penetration with the use of new design of penetrometer's probe tip. International Journal of Environmental and Science Education, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 10941–10950.

10. Antipas, I.-R., Dyachenko, A.G. Ispol'zovanie metoda podachi vozdukha pod davleniem v pochvu dlya opredeleniya sily soprotivleniya proniknoveniyu pri razlichnoy vlazhnosti. [Using the technique of air injection into soil to determine penetration resistance force at different humidity.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 4 (87), pp. 155–163 (in Russian).

Поступила в редакцию 11.03.2017
Сдана в редакцию 11.03.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 11.03.2017
Submitted 11.03.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8141-9529
imad.antypas@mail.ru

Authors:

Antypas, Imad Rizakalla,
associated professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associated professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8141-9529
imad.antypas@mail.ru

Савостина Татьяна Петровна,
ассистент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5550-7624
kovtanya@yandex.ru

Саед Бакир Имад,
доцент кафедры «Сельскохозяйственное машино строение» университета Алеппо (Сирийская арабская республика, Алеппо), доктор технических наук, доцент,
Imad12sb@gmail.com

Savostina, Tatiana P.,
teaching assistant of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5550-7624
kovtanya@yandex.ru

Saed Bakir Imad,
associate professor of the Agricultural Engineering Department, University of Aleppo (Syria, Aleppo), Dr. Sci. (Eng.), associate professor,
Imad12sb@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9.048.3 10.23947/1992-5980-2017-17-2-116-130

Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке*

А. В. Верченко[1], М. А. Тамаркин[2], А. А. Кишко[3]**

[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Cut face roughness analysis under waterjet cutting***

A. V. Verchenko[1], M. A. Tamarkin[2], A. A. Kishko[3]**

[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье показано, каким образом подача при гидроабразивной резке влияет на шероховатость поверхности реза. Резание выполняется смесью воды и абразива, испускаемых из сопла с высокой скоростью и под высоким давлением. Под действием режущей струи происходит эрозионное разрушение материала, частицы абразива снимают слой микростружки, а вода эвакуирует их из зоны резания. Методом гидроабразивной резки можно обрабатывать практически любые материалы. Процесс резки — «холодный», отсутствует термическое воздействие на металл. Возможна резка сложной геометрии — как 3D, так и 5D, например предварительная обработка моноколес газотурбинных двигателей.

Материалы и методы. Исследования проводились на базе РВПК ПАО «Роствертол» на установке гидроабразивной резки фирмы Flow. Обрабатывались материалы, наиболее часто применяемые в авиастроении: сталь 30ХГСА, алюминиевый сплав Д16Т, композит (стеклопластик-титан).

Результаты исследования. Проведены теоретические исследования влияния подачи сопла гидроабразивной резки на шероховатость поверхности реза. Получены зависимости определения шероховатости поверхности для характерного участка поверхности реза. Приведены рекомендации, позволяющие снизить число дефектов, возникающих при гидроабразивной резке. Выполнены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность полученных теоретических моделей.

Обсуждения и заключения. В результате исследований установлено, что шероховатость обработанной поверхности ухудшается с увеличением подачи. При этом ухудшение неравномерно распределено вдоль сечения реза. Для уменьшения ширины волнистого реза необходимо уменьшать значение подачи.

Ключевые слова: Гидроабразивная резка, подача режущей головки, шероховатость поверхности реза, эрозионное разрушение металла.

Introduction. The feeding effect on the cut face surface under waterjet cutting is considered. Cutting is done by water and abradant mixture emitted from the nozzle at high speed and high pressure. Under the cutting jet action, the erosion damage of the material occurs, the abrasive particles remove the microchipping layer, and water evacuates them from the cutting zone. Waterjet cutting can process almost any material.The cutting process is "cold", there is no thermal effect on the metal. It is possible to cut both 3D and 5D complex geometries, for example, to preprocess bladed integrated disks of the gas-turbine engines.

Materials and Methods. The research was carried out on the basis of the JSC "Rostvertol" enterprise on the waterjet cutting plant of the Flow company. The materials most frequently used in the aircraft industry were chosen: steel 30 KhGSA, aluminum alloy D16T, and composite material (fiberglass-titanium). The recommendations that allow reducing the number of defects under the waterjet cutting are given.

Research Results. The effect of the waterjet-cutting nozzle feeding on the cut face roughness is theoretically investigated. The dependences of the surface roughness determination for the distinguished segment of the cut face are obtained. The experimental studies confirming the adequacy of the theoretical models obtained are performed.

Discussions and Conclusions. As a result of the studies, it is found that the roughness of the treated surface deteriorates with increase in feeding. Furthermore, the deterioration is nonuniformly distributed along the cross-section of the cut. To reduce the width of the corrugated cut, the feedrate should be reduced.

Keywords: waterjet cutting, cutterblock feed, cut surface roughness, erosion damage of metal.

Введение. В машиностроении используются детали различных конфигураций, сложности, с разными требованиями по надежности и точности. Они изготавливаются из металлов и других материалов. Чаще всего это сталь, алюминий, пластик, стекло, композиты. В крупносерийном производстве детали получают методом штамповки,

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: tehn_rostov@mail.ru, Alex290292@mail.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

литья. На современном этапе развития техники и производства необходимы опытные образцы, прототипы, для которых изготовление дорогостоящих штампов или литейных форм нецелесообразно. Кроме того, в ряде областей промышленности (например, в авиа- и космостроении) изделие может состоять из десятков тысяч элементов при единичной применяемости некоторых деталей. Для уменьшения производственных затрат детали изготавливаются методом раскроя (резки) плит различных материалов толщиной от 0,5 до 200 мм с последующей механической обработкой или без нее. Применение фасонных заготовок из толстолистовых материалов позволяет сократить вспомогательное время при обработке на обрабатывающих центрах с ЧПУ за счет упрощения схемы базирования. Как и все технологические процессы, различные методы раскроя имеют достоинства и недостатки. Оптимальный метод обеспечивает наилучшее качество и точность реза при наименьших затратах времени и ресурсов [1].

Существуют механическая, лазерная, плазменная и электроэрозионная резка. Каждый из этих методов эффективен для узкого диапазона задач. Например, при механической резке невозможно получать фигурный профиль заготовки. Лазерная резка эффективна для толщин материала до 20 мм и не может использоваться для обработки композитов, токопроводящих и отражающих свет материалов. Плазменная резка обладает высокой производительностью, позволяет раскраивать металлы толщиной до 300 мм, но качество реза очень грубое, оплавляется кромка реза, образуется грат, точность реза невысокая. Электроэрозионный метод (ЭЭМ) позволяет получать очень качественный и чистый рез, но производительность низкая, а стоимость расходных материалов и оборудования высокая.

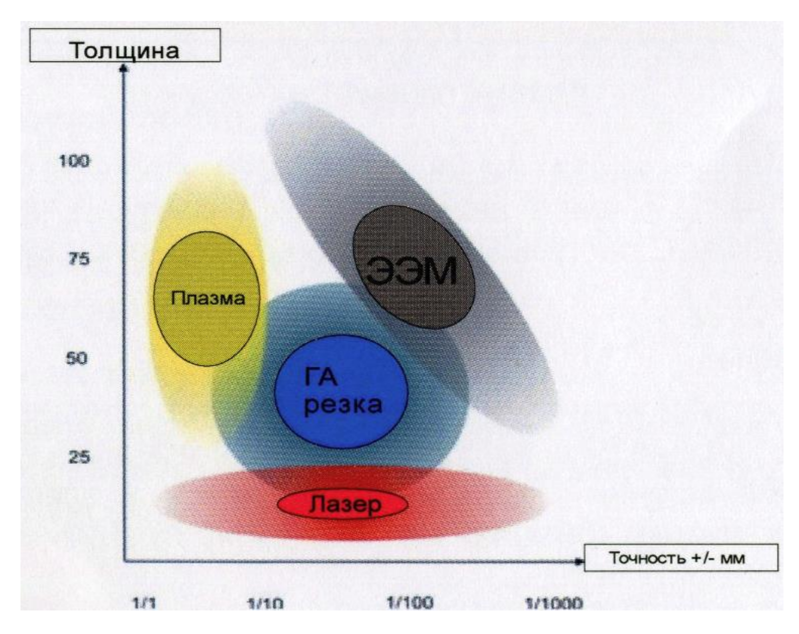


Рис. 1. Сравнение точности различных методов резки

Fig. 1. Comparison of accuracy of different cutting techniques

Гидроабразивная (ГА) резка — это новый, сложный и малоизученный процесс раскроя и резки материалов, не имеющий аналогов по производительности. Позволяет обрабатывать материалы различной толщины и физико-механических свойств. Обладает следующими преимуществами:

- Позволяет обрабатывать различные материалы и их комбинации (металл, пластмасса, стекло, камень, дерево, композитные материалы).
- Отсутствие термического воздействия исключает изменение структуры обрабатываемого материала.
- Механическая нагрузка на деталь незначительна.
- Диапазон толщин разрезаемых материалов очень широк: от 0 до 300 мм.
- Возможна резка контуров со сложной 3D-геометрией.
- Высокое качество кромки.

В сравнении с лазерной резкой:

- нет ограничений по толщине материала;
- возможна обработка металлов, имеющих отражающие свойства (медь, алюминий, титан);
- возможна резка материалов, чувствительных к нагреву (резина, пластик, композит, стекло).

В сравнении с плазменной резкой:

- не оплавляются кромки;

- не образуется грат;
- более широкий диапазон обрабатываемых материалов и толщин;
- более высокая точность криволинейных профилей.

В сравнении с фрезерованием:

- более высокая скорость обработки сквозных отверстий и резки по контуру;
- более качественная обработка тонколистовых деталей.

В сравнении с электроэрозионной обработкой:

- значительно более высокая скорость резки;
- возможность резки токопроводящих и токонепроводящих материалов;
- отсутствие зон термического влияния.

Процесс гидроабразивной резки зависит от ряда параметров:

- давление рабочей струи жидкости и абразива,
- расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности,
- скорость подачи режущей головки,
- толщины и физико-механические свойства материала,
- концентрация абразива в смеси рабочей струи,
- диаметр смешивающего сопла и др.

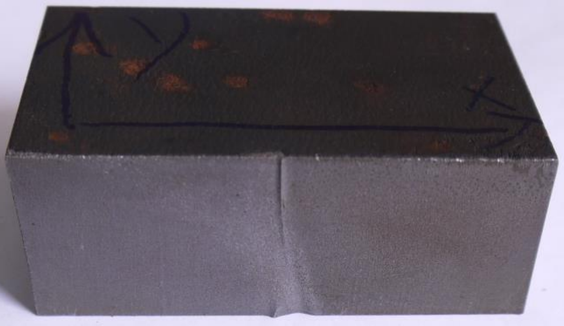
В процессе резания материал разрушается смесью воды и абразива, испускаемых из калибрующего сопла с высокой скоростью под высоким давлением (порядка 6000 бар). Вода эвакуирует микростружку и отработанные частицы абразива из зоны резания. В качестве абразива могут использоваться различные материалы, но наибольшее распространение получил гранатовый песок (твердостью 7,5–8 по шкале Моса), оливин (6,5–7 по шкале Моса) и электрокорунды. В работах российских исследователей рассматриваются процесс резки; параметры, влияющие на точность и качество резки; основные дефекты [2, 3, 4]. Однако в данных публикациях не представлены процессы, протекающие при давлении выше 30 МПа.

Эксперименты проводились на предприятии РВПК ПАО «Роствертол». Были исследованы материалы, наиболее часто используемые при изготовлении деталей авиатехники (вертолетов и самолетов): сталь 30ХГСА, алюминиевый сплав Д16Т и композит стеклопластик-титан.

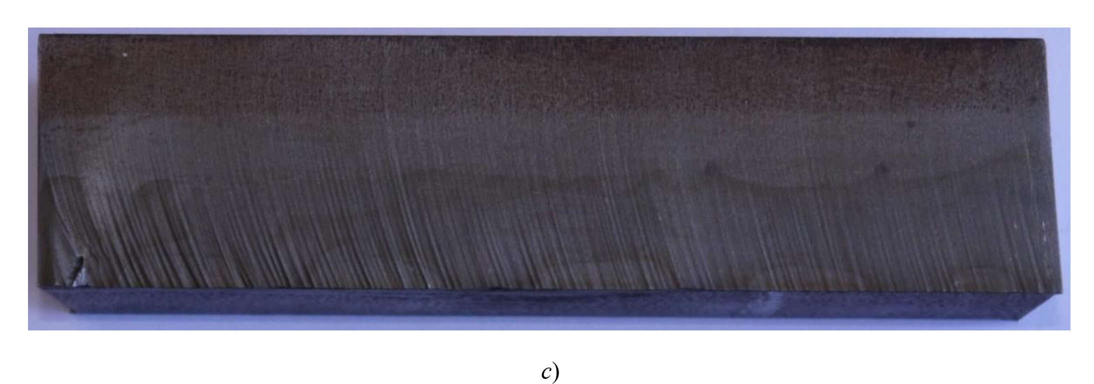
Основная часть. Преимущества гидроабразивной резки очевидны. Но в процессе резания возникают дефекты, природа которых связана с утратой энергии режущей струи, проходящей сквозь материал. Режущая способность струи определяется кинетической энергией — скоростью режущей струи, а также формой и массой абразива. В процессе резания абразив разрушается, теряя изначальную форму. Поток, проходя через слой материала, замедляется, струя отклоняется в направлении, противоположном направлению подачи режущей струи. В результате этого отклонения образуются дефекты. Основной — неравномерность шероховатости реза. Условно можно выделить две зоны: гладкого и волнистого реза. Они отличаются высотой профиля шероховатости и волнистости поверхности. Другие дефекты: недорез материала на пересечении внешних граней детали, зарез, образование лунок на пересечении внутренних граней деталей, образование лунок, зарез или недорез на месте входа-выхода режущей струи (рис. 2).



a)



b)



c)



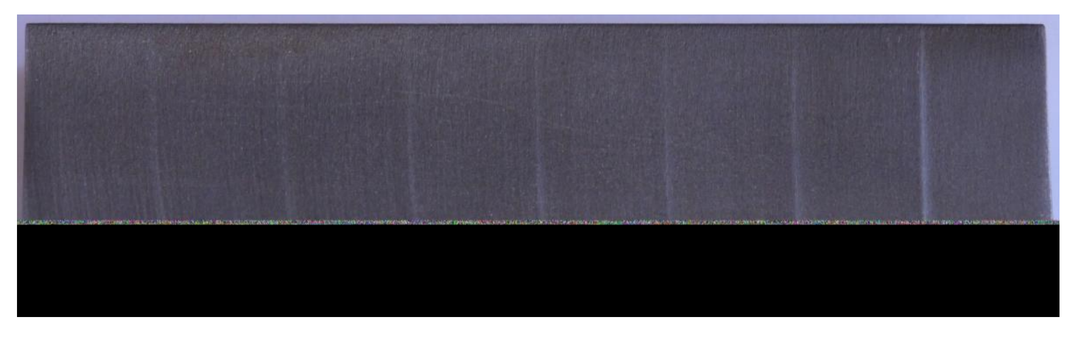
d)

Рис. 2. Дефекты гидроабразивной резки: недорез по внешнему углу (*a*); зарез на входе-выходе струи (*b*); неравномерность шероховатости поверхности реза (*c*); образование лунок на пересечении внутренних граней детали, образование лунки на месте входа-выхода режущей струи (*d*)

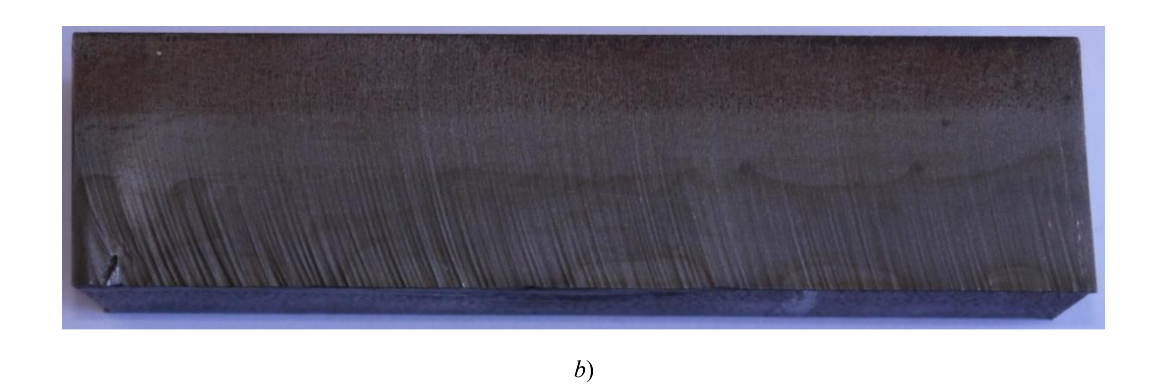
Fig. 2. Waterjet cutting defects: outer corner undercut (*a*); overcut at jet input-output (*b*); cut surface roughness nonuniformity (*c*); cratering at the interjection of part inner face, cratering at jet input-output (*d*)

Для выявления дефектов гидроабразивной резки проводилась серия экспериментов на примере трех различных материалов толщиной 30 мм: сталь 30ХГСА, алюминий Д16Т, участок лонжерона несущего винта вертолета МИ-28 из композиционного материала [5, 6, 7].

Эксперимент проводился на установке гидроабразивной резки фирмы Flow на образцах из трех материалов при постоянном давлении в 400 Мпа. Использовался гранатовый абразив зернистостью 80 мкм. В ходе эксперимента изменялся диапазон подачи режущей струи от 5 до 120 мм/мин (рис. 3).



a)



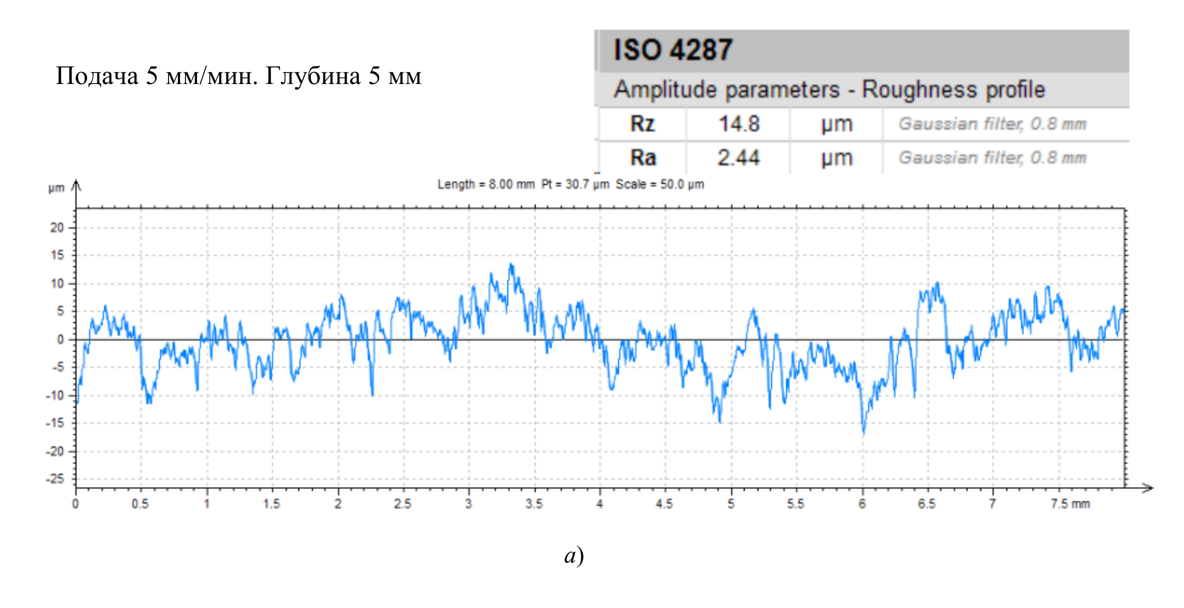
b)

c)

Рис. 3. Поверхность реза образца из стали 30ХГСА толщиной 30 мм при увеличении подачи: от 5 до 40 мм/мин (*a*); от 45 до 80 мм/мин (*b*); от 85 до 120 мм/мин (*c*)

Fig. 3. Cut surface of 30KhGSA steel sample of 30 mm thick with feed increase: from 5 to 40 mm / min (*a*); from 45 to 80 mm / min (*b*); from 85 to 120 mm / min (*c*)

С помощью профилометра Tailor Hobson были произведены замеры шероховатости поверхности на характерных участках глубины реза. Эксперименты проводились при подаче 5 мм/мин (рис. 4) и 80 мм/мин (рис. 5).



a)

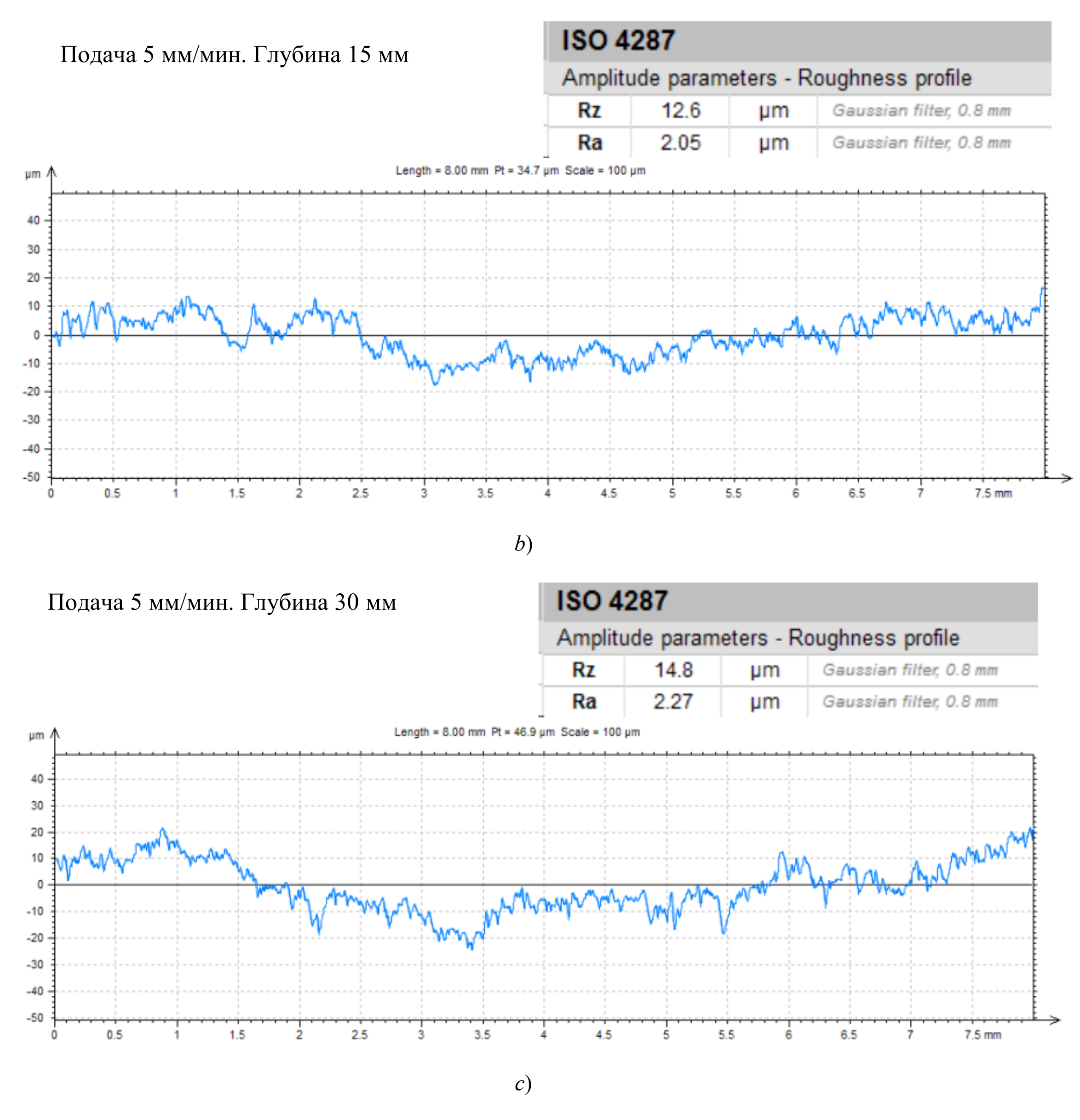


Рис. 4. Профилограмма поверхности реза образца из стали 30ХГСА при подаче 5 мм/мин: на глубине реза 5 мм (*a*); на глубине реза 15 мм (*b*); на глубине реза 30 мм (*c*)

Fig. 4. Profilograph of cut surface of 30KhGSA steel sample at feed of 5 mm / min: at cut depth of 5 mm (*a*); at cut depth of 15 mm (*b*); at cut depth of 30 mm (*c*)

Подача 80 мм/мин. Глубина 5 мм

ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rz	15.9	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	2.96	µm	Gaussian filter, 0.8 mm

Length = 8.00 mm Pt = 37.8 µm Scale = 100 µm

a)

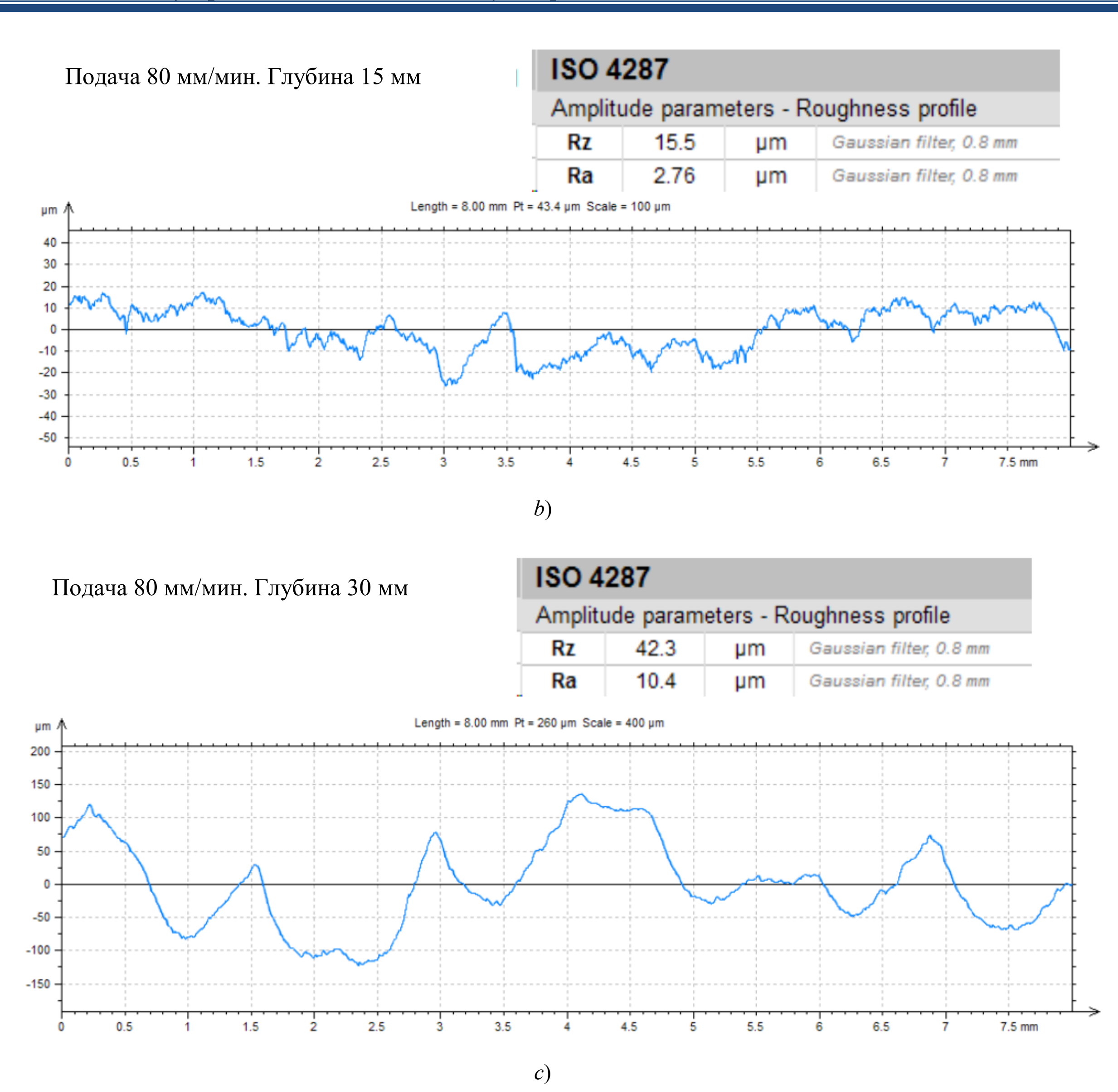


Рис. 5. Профилограмма поверхности реза образца из стали 30ХГСА при подаче 80 мм/мин: на глубине реза 5 мм (*a*); на глубине реза 15 мм (*b*); на глубине реза 30 мм (*c*)

Fig. 5. Profilograph of cut surface of 30KhGSA steel sample at feedof 80 mm / min: at cut depth of 5 mm (a); at cut depth of 15 mm (*b*); at cut depth of 30 mm (*c*)

Итак, при увеличении подачи растет значение шероховатости поверхности. Значение шероховатости изменяется и по сечению реза: у вершины реза поверхность равномерная, к низу реза образуется волнистая поверхность (рис. 6). Это явление связано с тем, что струя теряет режущую способность и отклоняется от начальной траектории в направлении, противоположном направлению подачи.

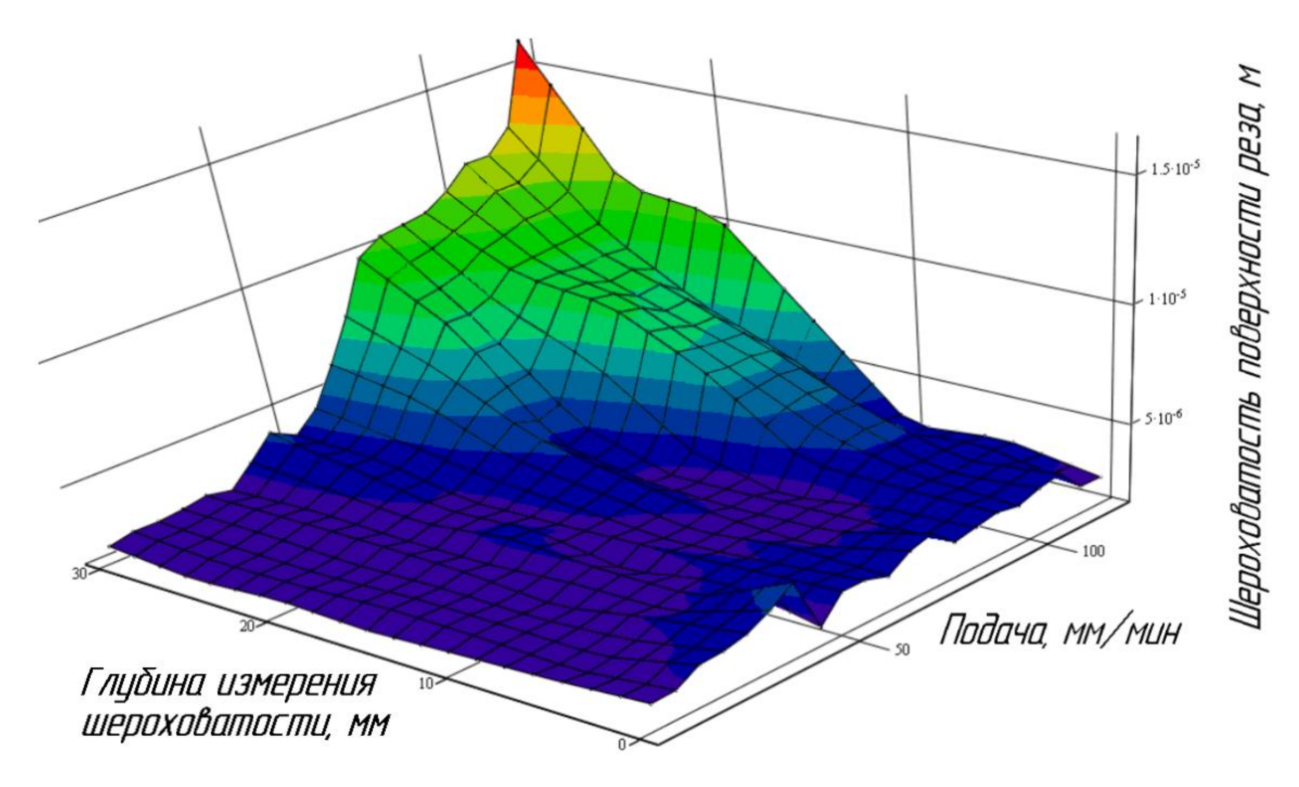


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности реза от подачи резания и глубины измерения по сечению реза

Fig. 6. Dependence of cut surface roughness on feed cutting and measuring depth along the cut section

Были изготовлены и проанализированы образцы из алюминиевого сплава Д16Т (рис. 7) и композита (рис. 8). В ходе опытов установлено, что при равных значениях подачи на более мягких материалах (алюминиевый сплав) наблюдаются худшее значения шероховатости, чем на более твердых.

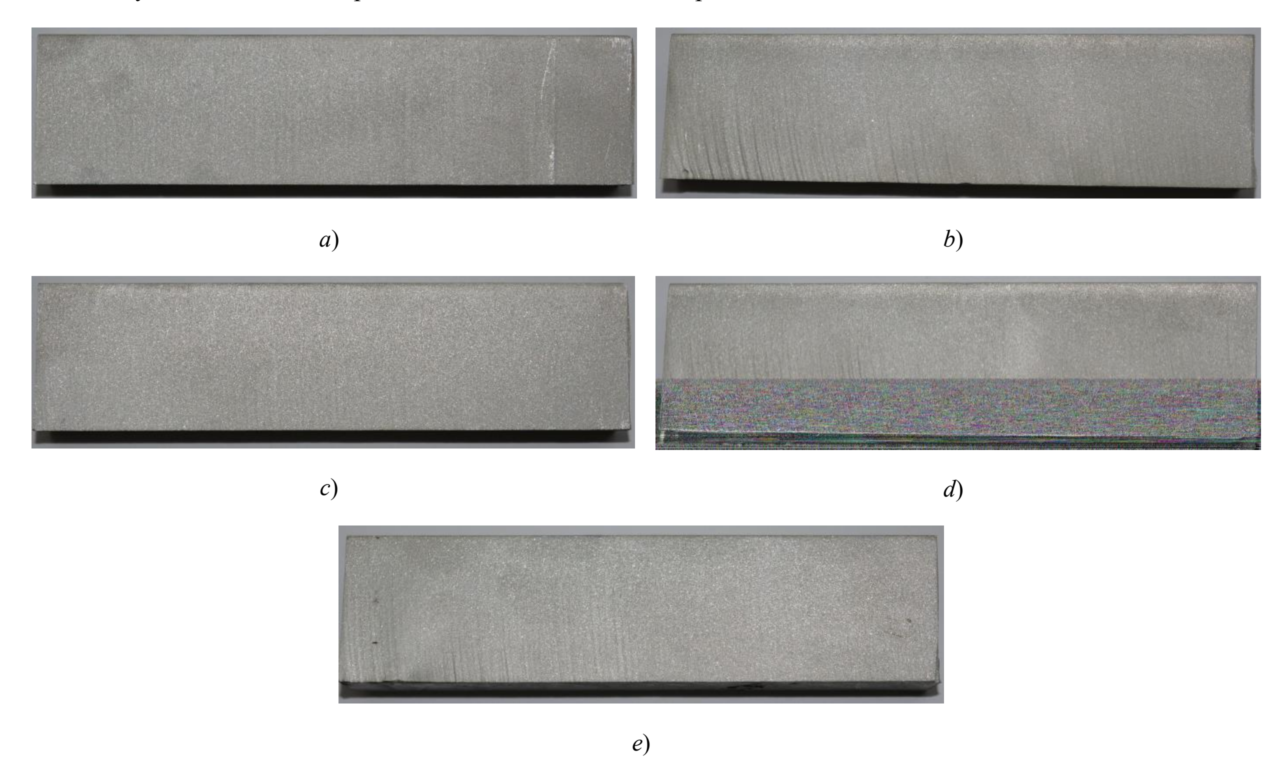


Рис. 7. Поверхность реза на образцах из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 30 мм при увеличении подачи: от 5 до 40 мм/мин (*a*); от 45 до 80 мм/мин (*b*); от 85 до 120 мм/мин (*c*); от 125 до 160 мм/мин (*d*); подача от 165 до 200 мм/мин (*e*)

Fig. 7. Cut surface on samples of aluminum alloy D16T with thickness of 30 mm at feed rate increase: from 5 to 40 mm / min (a); from 45 to 80 mm / min (*b*); from 85 to 120 mm / min (*c*); from 125 to 160 mm / min (*d*); from 165 to 200 mm / min (*e*)

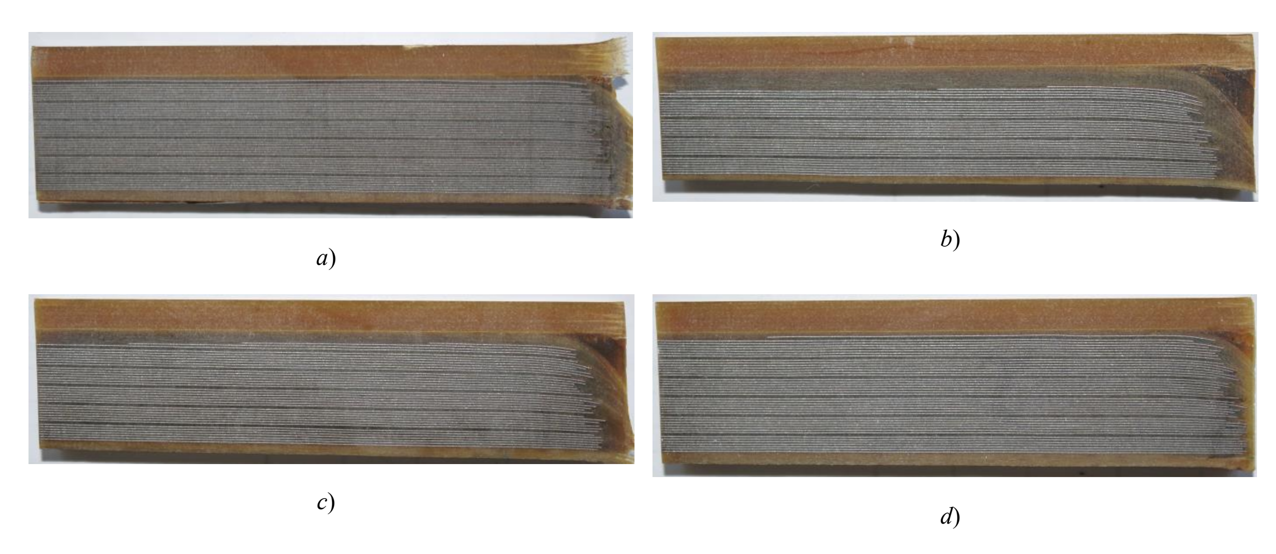


Рис. 8. Поверхность реза на образце из композиционного материала (титановая фольга — стеклопластик) толщиной 30 мм

Fig. 8. Cut surface on sample of composite material (fiberglass-titanium) with thickness of 30 мм

Были проведены теоретические исследования, построена теоретическая модель зависимости шероховатости реза от величины подачи режущей струи, аналогичная схеме образования шероховатости поверхности при шлифовании, предложенной А. В. Королевым [8]. В этой работе для описания процесса образования профиля шероховатости поверхности при шлифовании и других видах абразивной обработки в качестве критерия предлагается параметр $H_{ус}$ (условная высота неровностей обрабатываемой поверхности) и рассматривается методика определения стандартных параметров шероховатости поверхности при его использовании.

Шероховатость поверхности детали после обработки свободными абразивами представляет собой совокупность царапин, оставленных абразивными частицами. При этом царапины частично наложены друг на друга и поэтому имеют неровные края (рис. 9).

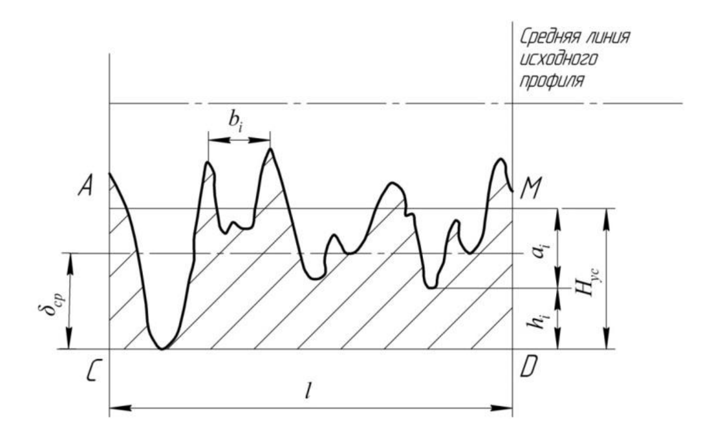


Рис. 9. Схема образования профиля шероховатости поверхности при обработке свободными абразивами

Fig. 9. Diagram of formation of surface roughness profile under loose abrasive treatment

Если бы частицы делали только полные срезы, то на некотором уровне нормального сечения детали сумма ширины всех полных срезов была бы равна ширине обрабатываемого участка:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = L_{ед} \qquad (1)$$

где $z_{сеч}$ — количество зерен, оставивших свой след в данном нормальном сечении детали.

При этом вершины всех неровностей в сечении AMCD располагались бы на одной линии (аналогично процессу шлифования при глубине резания, большей $H_{ус}$) [8].

Средняя линия между вершинами всех неровностей в данном нормальном сечении детали находится на том уровне, где сумма ширины всех частиц, прошедших через данное сечение детали, равна ширине обрабатываемого участка. Дальнейшие расчеты будем производить на единице длины нормального сечения детали $L_{ед}$, так как величины $z_{сеч}$ и $L_{ед}$ связаны между собой [9, 10, 11, 12].

Величину Нус определим при условии, что именно на этой высоте выполняется равенство:

$$\text{при}\ , z_i = 0{,}5z_0\left(\frac{h_i}{H_0}\right)^k, \text{ при } 0 \le h_i \le H_0 \tag{2}$$

где z_i — число лунок на уровне l_i от отпечатка наибольшей глубины h_{max}; z_0 — номинальное количество взаимодействующих частиц над квадратом упаковки рабочей среды; H_0 — разность глубин следов; k — показатель распределения глубины отпечатков.

Для уровня $H_{ус}$ можно записать:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = \sum_{i=1}^{z_{сеч}} 3{,}8a_i = 3{,}8\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = L_{вд}. \tag{3}$$

Для нахождения глубины царапины a_i в рассматриваемом нормальном сечении детали обратимся к форме единичного следа при обработке свободными абразивами (рис. 10).

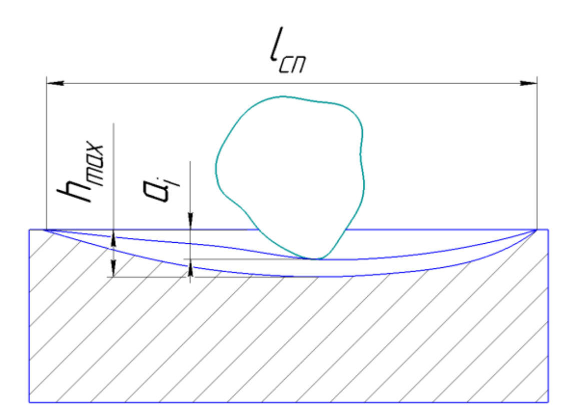


Рис. 10. Схема продольного сечения единичного следа абразивной частицы

Fig. 10. Diagram of longitudinal section of single track of abrasive particle

За расчетную глубину внедрения a_i частицы можно взять произведение максимально возможной глубины $h_{max} - h_i$ на вероятность $P_{вн}$ внедрения частицы с этой глубиной. Исходя из геометрической вероятности случайного события, искомая вероятность равна отношению площади, ограниченной продольной траекторией данной частицы при ее внедрении, к площади, ограниченной продольной траекторией движения частицы с максимальной глубиной внедрения [13, 14, 15]:

$$P_{BH} = \frac{L_{cn}\left(h_{\max} - h_i\right)}{L_{ck}h_{\max}} = \frac{h_{\max} - h_i}{h_{\max}}.$$

$$a_i = \frac{\left(h_{\max} - h_i\right)^2}{h_{\max}};\ \ a_i = h_{\max}\left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 \tag{4}$$

Тогда сумма глубин всех царапин, оставленных частицами в нормальном сечении АМСД:

$$\sum_{i=1}^{z_{ctx}} a_i = h_{\max}\sum_{i=1}^{z}\left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2, \tag{5}$$

где $Z_{сеч}$ — общее число всех зерен, контакт которых возможен с данным нормальным сечением детали.

При достаточно большом значении $Z_{сеч}$ (при прохождении нескольких частиц через данное нормальное сечение детали) от суммирования можно перейти к интегрированию. Для этого выразим величину h_i через соответствующее число зерен Z_i, контакт которых возможен с сечением AMCD на глубине h_i. После преобразований получим:

$$h_i = H_0 \left(2\frac{z_i}{z_0} \right)^{\frac{1}{k}}, \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{z_{ctx}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}} \right)^2 = \int_0^1 \left(1 - \frac{H_0}{h_{\max}} \left(2\frac{z_i}{z_0} \right)^{\frac{1}{k}} \right)^2 dz_i \quad . \tag{7}$$

Проведем замену:

$$\frac{H_0}{h_{\max}} \left(2\frac{z_i}{z_0} \right)^{\frac{1}{k}} = \psi, \tag{8}$$

где z_0 — число зерен, проходящих через единичную длину в единицу времени.

После проведения соответствующих преобразований получим:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}} \right)^2 = k \cdot z_{сеч} \cdot \int_0^1 (1-\psi) \cdot \psi^{k-1} d\psi \, . \tag{9}$$

Интеграл представляет собой бета-функцию. Выразив ее через гамма-функцию получим:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}} \right)^2 = k \cdot z_{сеч} \cdot \frac{\Gamma_{(з)} \cdot \Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+з)}} = 2 \cdot k \cdot z_{сеч} \frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+з)}} \, . \tag{10}$$

Подставив полученное выражение в (5), получим:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = 2k z_{сеч} h_{\max} \frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+з)}} \, . \tag{11}$$

С учетом ранее полученных зависимостей:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = 7{,}6 k z_{сеч} h_{\max} \frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+з)}} = L_{вд} \, . \tag{12}$$

При этом на уровне АМ (см. рис. 9) zсеч определится следующим образом:

$$z_{сеч} = 0{,}5 z_0 \left(\frac{H_{ус}}{H_0} \right)^k . \tag{13}$$

Подставив полученное выражение в (12), получим:

$$3{,}8 k z_0 \left(\frac{H_{ус}}{H_0} \right)^k \frac{\Gamma_{(к)}}{\Gamma_{(к+з)}} = L_{вд} \, . \tag{14}$$

Учитывая, что значения показателя степени для всех видов абразивной обработки лежат в пределах [1], сделаем допущения, что при гидроабразивной резке можно принять . При этом получим:

$$7{,}6 z_0 \left(\frac{H_{ус}}{H_0} \right)^2 \frac{\Gamma_{(2)}}{\Gamma_{(5)}} h_{\max} = L_{вд} \, . \tag{15}$$

После соответствующих преобразований получим зависимость:

$$H_{ус} = H_0 \sqrt{\frac{L_{вд}}{0{,}32 h_{\max} z_0}} \tag{16}$$

Максимальная глубина внедрения частицы описана в работах М. А. Тамаркина, А. А. Тихонова [7, 8]:

$$H_{\max} = DK_L \sin\alpha \sqrt{\frac{2P_{дин}P_ч}{3c\rho_{см}k_{sx}\sigma_s}}\ , \tag{17}$$

где $\rho_ч$ — плотность материала частиц, *кг/м*^{3}; K — объемная концентрация частиц в рабочей жидкости; $P_{дин}$ — динамическое давление смеси, Па; $\rho_{см}$ — плотность рабочей смеси жидкости и частиц, *кг/м*^{3}; D — диаметр частицы, *кг/м*^{3}; K_L — коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали.

Опираясь на данные, полученные в работе [8], и таблицу значений отношения $\frac{H_{ус}}{Ra}$ в зависимости от f_0 (табл.), распространим зависимость на процесс гидроабразивной резки при $f_0 = 3$.

Таблица 1

Table 1

Значения соотношения в зависимости от f_0

Relationship values depending on f_0

f_0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$\frac{H_{ус}}{Ra}$	3,25	4,26	5,36	6,36	7,32	8,12	9,0	10,1	10,9

Примем $\frac{H_{ус}}{Ra} = 6{,}4$. Используя соотношение (5), после преобразований получим зависимость для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости:

$$Ra = \frac{H_0}{3{,}6}\sqrt{\frac{L_{вд}}{h_{\max} z_0}}\ . \tag{18}$$

Для проведения расчетов по зависимостям (16) и (18) необходимо определить величину разновысотности активных зерен H_0. При гидроабразивной резке значение H_0 не может быть определено экспериментально. Величина H_0 зависит от зернистости абразивных частиц, режимов обработки и механических свойств материала обрабатываемой детали, т. е. от тех же параметров, что и . $h_{\max}$ При этом согласно определению значение должно быть меньше $h_{\max}$. Для проведения теоретических расчетов, учитывая данные, приведенные в работах [8, 11, 12, 13], сделаем допущение, что при гидроабразивной резке

$$H_0 = \frac{h_{\max}}{3}\ . \tag{19}$$

Тогда зависимости для расчета условной высоты и среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости будут выглядеть следующим образом:

$$H_{ус} = 0{,}58\sqrt{\frac{h_{\max}L_{ед}}{z_0}}\ , \tag{20}$$

$$Ra = 0{,}09\sqrt{\frac{h_{\max}L_{ед}}{z_0}}\ . \tag{21}$$

Итак, z_0 — это число зерен, проходящих через единичную длину в единицу времени; λ — это число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки. Значит, через сторону квадрата упаковки $2R$ будет проходить $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину будет проходить в $\frac{L_{вд}}{2R}$ больше частиц:

$$H_{yc} = 0,84\sqrt{\frac{h_{\max}R}{\sqrt{\lambda}}}, \tag{22}$$

$$Ra = 0,13k_{\alpha}^{Ra}\sqrt{\frac{h_{\max}R}{\sqrt{\lambda}}}, \tag{23}$$

где k_{α}^{Ra}— коэффициент, учитывающий угол падения струи.

Для анализа влияния размеров обрабатывающей среды, динамического давления пульпы и механических свойств материала детали на величину Ra при гидроабразивной резке произведем расчеты по зависимости (23) (рис. 11).

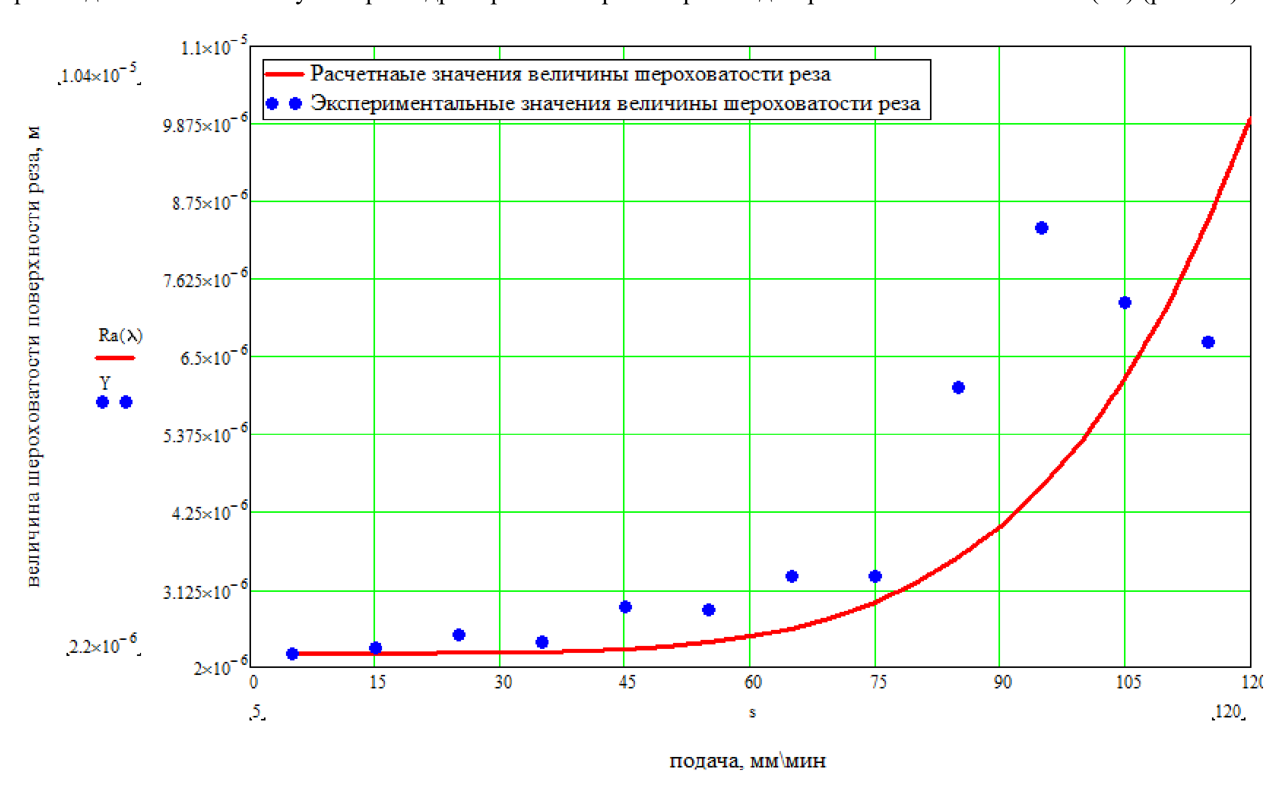


Рис. 11. Зависимость шероховатости поверхности реза от величины подачи режущей головки

Fig. 11. Dependence of cut surface roughness on feed rate of cutterblock

Заключение. Полученная зависимость применима для определения шероховатости реза. С учетом требований к поверхности детали определяется, требуется ли дальнейшая чистовая обработка поверхности с последующим удалением припуска. При образовании недорезов на внешних и внутренних пересечениях граней детали рекомендуется применять замедление подачи. Во избежание негативных эффектов в месте входа-выхода струи рекомендуется оставлять недорез либо использовать врезание и отвод режущей струи по траектории дуги.

Библиографический список

1. Чигринец, Е. Г. Оптимизация процесса сверления армированного титаном стеклопластикового лонжерона лопасти несущего винта вертолета / Е. Г. Чигринец // Вестник Московского авиационного института. — 2016. — Т. 23, № 1. — С. 177–188.

2. Барсуков, Г. В. Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования технологической системы : дис. … д-ра техн. наук / Г. В. Барсуков. — Орел, 2006. — 411 с.

3. Zeng, J. Intelligent Automation of AWJ Cutting for Efficient Prodaction /J. Zeng, J.-P. Munoz // Proc. of the 12th Int. Symp on jet Cutting Technology. — Rouen : BHRA, 1994. — P. 401–408.

4. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. — 2-е изд., испр. — Москва : Высшая школа, 2005. — 544 с.

5. Гидрорезание судостроительных материалов / Р. А. Тихомиров [и др.]. — Ленинград : Судостроение, 1987. — 164 с.

6. Билик, Ш. М. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш. М. Билик. — Москва : Машгиз, 1960. — 198 с.

7. Тихонов, А. А. Повышение эффективности процесса гидроабразивной обработки : дис. ... канд. техн. наук / А. А. Тихонов. — Ростов-на-Дону, 2011. —157 с.

8. Королев, А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. — 191 с.

9. Тамаркин, М. А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М. А. Тамаркин. — Ростов-на-Дону, 1995. — 32 с.

10. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1994. — 187 с.

11. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1989. — 320 с.

12. Тамаркин, М. А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами : дис. … д-ра. техн. наук / М. А. Тамаркин. — Ростов-на-Дону, 1995. — 153 с.

13. Tamarkin, M. A. The optimization of theological processes of details processing by free abrasives / M. A. Tamarkin // Key Engineering Materials. — 2005. — Vol. 291/292. — P. 319–322.

14. Tamarkin, M. A. Surface-layer quality in shot treatment / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, V. G. Lebedenko // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, № 2. — P. 144–148.

15. Tamarkin, M. A. Metal removal in hydroabrasive machining / M. A. Tamarkin, A. A. Tikhonov, E. E. Tishchenko // Russian Engineering Research. — 2014. — Vol. 34, № 3. — P. 175–177.

References

1. Chigrinets, E.G. Optimizatsiya protsessa sverleniya armirovannogo titanom stekloplastikovogo lonzherona lopasti nesushchego vinta vertoleta. [Titanium-reinforced glass fiber plastic main rotor blade beam drilling process optimization.] Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 177–188 (in Russian).

2. Barsukov, G.V. Povyshenie effektivnosti gidroabrazivnogo rezaniya na osnove diskretnogo regulirovaniya tekhnologicheskoy sistemy : dis. … d-ra tekhn. nauk. [Improving hydroabrasive cutting efficiency on the basis of discrete adjustment of the technological system: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Orel, 2006, 411 p. (in Russian).

3. Zeng, J., Munoz, J.-P. Intelligent Automation of AWJ Cutting for Efficient Production. Proc. of the 12th Int. Symp on Jet Cutting Technology. Rouen : BHRA, 1994, pp. 401–408.

4. Panteleev, A.V., Letova, T.A. Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh. [Optimization methods in examples and problems.] 2nd rev. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 544 p. (in Russian).

5. Tikhomirov, R.A., et al. Gidrorezanie sudostroitel'nykh materialov. [Hydro-cutting of shipbuilding materials.] Leningrad : Sudostroenie, 1987, 164 p. (in Russian).

6. Bilik, S.M. Abrazivno-zhidkostnaya obrabotka metallov. [Abrasive water processing of metals.] Moscow: Mashgiz, 1960, 198 p. (in Russian).

7. Tikhonov, A.A. Povyshenie effektivnosti protsessa gidroabrazivnoy obrabotki : dis. ... kand. tekhn. nauk. [Improving the efficiency of the hydroabrasive treatment: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2011, 157 p. (in Russian).

8. Korolev, A.V. Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke. [Study on surface generation of tool and part under abrasive processing.] Saratov : Izd-vo Saratov. un-ta, 1975, 191 p. (in Russian).

9. Tamarkin, M.A. Tekhnologicheskie osnovy optimizatsii protsessov obrabotki detaley svobodnymi abrazivami : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. [Optimization techniques of workpart treatment by loose abrasives: Dr.Sci. (Eng.) diss., author's abstract.] Rostov-on-Don, 1995, 32 p. (in Russian).

10.Babichev, A.P. Osnovy vibratsionnoy tekhnologii. [Vibration technology fundaentals.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1994, 187 p. (in Russian).

11.Korolev, A.V., Novoselov, Y.K. Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoy obrabotki. [Probability-theoretic fundamentals of abrasive treatment.] Saratov : Izd-vo Saratov. un-ta, 1989, 320 p. (in Russian).

12.Tamarkin, M.A. Teoreticheskie osnovy optimizatsii protsessov obrabotki detaley svobodnymi abrazivami : dis. … d-ra. tekhn. nauk. [Theoretical basics of optimization techniques of workpart treatment by loose abrasives: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 1995, 153 p. (in Russian).

13.Tamarkin, M.A. The optimization of technological processes of details processing by free abrasives. Key Engineering Materials, 2005, vol. 291/292, pp. 319–322.

14.Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Lebedenko, V.G. Surface-layer quality in shot treatment. Russian Engineering Research, 2010, vol. 30, no. 2, pp. 144–148.

15. Tamarkin, M.A., Tikhonov, A.A., Tishchenko E.E. Metal removal in hydroabrasive machining. Russian Engineering Research, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 175–177.

Поступила в редакцию 02.03.2017
Сдана в редакцию 02.03.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 02.03.2017
Submitted 02.03.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич,
заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Верченко Алексей Викторович,
аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2898-039X
Alex290292@mail.ru

Кишко Александр Александрович,
магистрант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3149-0455
Aleksandr_Kishko@mail.ru

Authors:

Tamarkin, Mikhail A.,
Head of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Verchenko, Alexey V.,
postgraduate of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2898-039X
Alex290292@mail.ru

Kishko, Alexander A.,
master of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2898-039X
Aleksandr_Kishko@mail.ru

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 631.3:531:517:9777 10.23947/1992-5980-2017-17-2-131-135

Влияние продольно-угловых колебаний молотилки зерноуборочного комбайна на плавность хода жатки[*]

Л. М. Грошев[1], С. А. Партко[2], А. Н. Сиротенко[3]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of longitudinal-angular oscillations of the harvester-thresher separator on smooth motion of the reaper [***]

L. M. Groshev[1], S. A. Partko[2], A. N. Sirotenko[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассмотрено влияние вибрационных низкочастотных колебаний жатки на потери урожая отечественных зерноуборочных комбайнов. При проведении исследования учитывались различные скорости движения машины, различные массово-геометрические и упругодиссипативные характеристики агрегатов. Определены геометрические параметры подвесной системы жатвенной части комбайна, обеспечивающие плавность хода и снижение потерь урожая за жаткой. С учетом массово-геометрических и упругодиссипативных характеристик определены амплитудные и частотные спектры колебаний отечественных машин агропромышленного комплекса. Предложена математическая зависимость вибраций жатки от условий работы комбайна.
Материалы и методы. Использовано математическое моделирование колебаний узлов с учетом продольно-вертикальных колебаний корпуса молотилки и вертикальных колебаний жатки. Решено уравнение в частотной области.
Результаты исследования. Составлена двухмассовая колебательная модель и получены соответствующие дифференциальные уравнения движения. Представлены графики зависимостей среднеквадратических нагрузок на башмаках при различных параметрах подвески жатки. Установлены геометрические параметры системы подвески жатвенной части комбайна, обеспечивающие плавность хода и снижение потерь урожая за жаткой. Выявлена взаимосвязь между изменением числа отрывов башмаков, линейной скоростью машины и параметрами подвески жатки.
Обсуждение и заключения. Проведенные научные изыскания позволяют сделать следующие выводы: частотные характеристики реакции от башмаков обусловлены параметрами подвески жатки и молотилки; система подвески жатки в отечественных зерноуборочных комбайнах не обеспечивает безотрывную работу жатки в режиме копирования микрорельефа почвы, что приводит к возникновению дополнительных колебаний корпуса и потере урожая; интенсивность паразитных колебаний можно уменьшить путем увеличения вылета жатвенной части от корпуса молотилки и уменьшением жесткости подвески жатки.

Introduction. The effect of the low-frequency oscillations of the reaper on crop losses of the domestic combine harvesters is considered. In the study, various speeds of the machine, various mass-geometric and elastic-dissipative characteristics of the units are taken into account. The geometrics of the overhead system of the combine reaping section which ensures smooth running and reduces crop losses for the reaper is determined. Taking into account the mass-geometric and elastic-dissipative characteristics, the amplitude and frequency spectra of the oscillations of the domestic machines of the agroindustrial complex are determined. The mathematical dependence of the reaper oscillations on the combine operation conditions is proposed.
Materials and Methods. The mathematical modeling of units vibrations is used with account for the longitudinal-vertical oscillations of the separator body and the heaving of the reaper. The equation in the frequency domain is solved.
Research Results. A two-mass oscillatory model is constructed, and the corresponding differential equations of motion are obtained. The graphs of dependences of RMS loads on shoes with different parameters of the suspension are presented. The geometrics of the suspension system of the harvester reaping part ensuring smooth running and lower crop losses for the reaper, is established. The relationship between the change in the number of detachments of the shoes, the linear speed of the machine and the parameters of the reaper suspension is educed.
Discussion and Conclusions. The conducted investigation allows drawing the following conclusions. Frequency characteristics of the shoes response are caused by parameters of the reaper and separator suspensions. The reaper suspension system in the domestic grain harvesters does not ensure the continuous operation of the reaper in the copy mode of the soil microrelief which leads to generating additional oscillations of the body and crop loss. The parasitic vibrations strength can be reduced by increasing the extension of the reaping part of the separator body and reducing the rigidity of the reaper suspension.

[*]Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**]E-mail: kaf-qm@dstu.edu.ru, parlana@spark-mail.ru, andsirotenko@yandex.ru
[***]The research is done within the frame of independent R&D.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, потери урожая, вертикальные колебания, жатка, амплитудно-частотная характеристика, спектральная плотность.

Keywords: combine harvester, crop losses, vertical oscillations, reaper, amplitude-frequency response, spectral density.

Введение. Для снижения потерь урожая можно совершенствовать не только молотильно-сепарирующие агрегаты [1], но и характеристики ходовой части комбайна. В отличие от колесных сельскохозяйственных тракторов, автомобилей и других мобильных машин АПК, ходовая система зерноуборочного комбайна на рабочих режимах должна обеспечивать копирование макро- и микрорельефа поверхности поля во избежание потерь урожая. Поэтому в ходовой системе практически заблокированы упругие элементы, обеспечивающие плавность хода машины.

На транспортных режимах работы плавность хода комбайна определяется упругодиссипативными и массово-геометрическими параметрами корпуса на пневматических шинах, а также параметрами привода ходовой системы.

При транспортировке зерноуборочного комбайна вертикальные колебания корпуса и крутильные колебания привода ходовой системы склонны к синхронизации, которая приводит к возникновению дополнительных вертикальных нагрузок в корпусе и крутящих моментов в приводе. В комбайне отсутствуют специальные амортизаторы, и затухание колебаний происходит только в упругих шинах.

Поэтому при проектировании и расчете агрегатов комбайна необходимо производить спектральный анализ ходовой части и определять частотные параметры, исключающие синхронизацию колебаний, влияющую как на ресурс агрегатов, так и на потери урожая.

Основная часть. Целью представленного исследования является определение геометрических параметров подвесной системы жатвенной части комбайна, обеспечивающих плавность хода и снижение потерь урожая за жаткой.

Для достижения поставленной цели необходимо определить амплитудные и частотные спектры колебаний отечественных машин агропромышленного комплекса с учетом их массово-геометрических и упругодиссипативных характеристик и предложить математическую зависимость вибраций жатки от условий работы комбайна.

В рамках данного исследования рассмотрены продольно-вертикальные колебания корпуса молотилки и вертикальные колебания жатки. При составлении дифференциальных уравнений колебаний узлов использовались уравнения Лагранжа.

На рис. 1 представлена двухмассовая модель, описывающая вертикальные колебания молотилки массой m_1 и жатки массой m_2 при движении комбайна по неровностям поля.

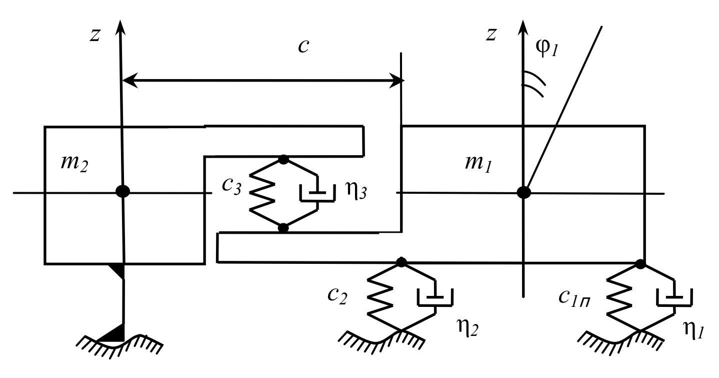


Рис. 1. Двухмассовая модель вертикальных колебаний молотилки и жатки при движении комбайна по неровностям поля

Fig. 1. Two-mass model of vertical oscillations of separator and reaper during combine movement over field unevenness

Модель представляет молотилку, жесткость шин колес которой — c_1 и c_2, а также жатку (жесткость системы навески — c_3). Коэффициенты затухания колебаний в системе — η_1, η_2, и η_3. Дифференциальные уравнения колебаний в операторной форме записи с изображений переменных по Лапласу известны по [2]. В результате их решения в частотной области получены выражения модулей передаточных функций для реакций жатки от башмаков [3]. При переходе от передаточных функций к амплитудно-частотной характеристике произведена замена $p = i\omega$.

Исследования выражений для частотных характеристик позволили установить, что частотные характеристики реакции от башмаков определяются параметрами подвески жатки и молотилки. Спектральная плотность нагрузок на башмаки $S_R(\omega)$ определялась по известной формуле статической динамики [4]:

$$S_R(\omega) = \left|W_R(i\omega)\right|^2 \cdot S_h(\omega), \quad (1)$$

где $\left|W_R(i\omega)\right|$ — соответствующий модуль передаточной функции.

В ходе исследований профилей полей на опытных полигонах [2, 5] получено выражение для спектральных плотностей воздействий $S_h(\omega)$:

$$S_h(\omega) = R_0 \frac{2\alpha\left(\alpha^2+\beta^2+\omega^2\right)}{\omega^4+2\left(\alpha^2+\beta^2\right)\omega^2+\left(\alpha^2+\beta^2\right)^2}, \tag{2}$$

где α, β — коэффициенты; R_0 — дисперсия неровностей поверхности поля.

Дисперсия реакции на башмаках определялась как:

$$D_R = \frac{1}{\pi}\int_0^{\omega_{\max}} S_h(\omega)\,d\omega. \tag{3}$$

Расчеты по выражениям (2) и (3) позволили построить графики зависимостей среднеквадратических нагрузок σ_R на башмаках при различных параметрах подвески жатки. Эти графики представлены на рис. 2.

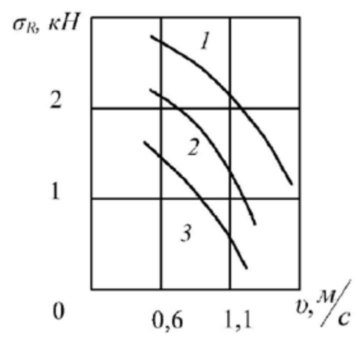


Рис. 2. Зависимость среднеквадратических нагрузок на башмаки от скорости агрегата: 1 — c = 0,8 м; 2 — c = 1 м; 3 — c = 1,2 м

Fig. 2. Dependence of RMS loads on shoes on the unit speed: 1 — c = 0.8 m; 2 — c = 1 m; 3 — c = 1.2 m

Затем были рассчитаны параметры отрыва башмаков от поверхности поля. Для этого определялось среднее количество превышения (в секунду) длительности случайного процесса изменения нагрузок при статической нагрузке и ниже нее. Расчеты среднего количества минимумов нагрузки в единицу времени проводились по формулам Райса:

$$N_0 = \frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\dot{\sigma}_R}{\sigma_R}\cdot e^{-\frac{R_{\text{СТ}}^2}{2\sigma_R^2}}, \tag{4}$$

где $\dot{\sigma}_R$ — среднее изменение скорости нагрузки; R_{CT} — статическая нагрузка на башмаках.

На рис. 3 представлены графики изменения числа отрывов башмаков N_0 при различных линейных скоростях машины ν и параметрах подвески жатки.

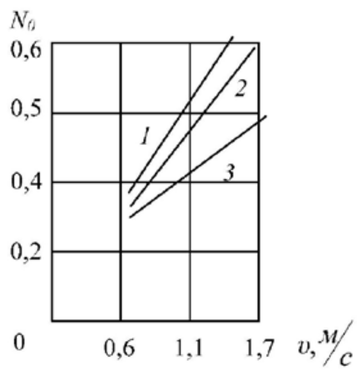


Рис. 3. Число отрывов башмаков: 1 — c = 0,8 м; 2 — c = 1 м; 3 — c = 1,2 м

Fig. 3. Number of detachments of shoes: 1 — c = 0.8 m; 2 — c = 1 m; 3 — c = 1.2 m

Проведенные исследования [6, 7] позволили установить, что система подвески жатки для отечественных зерноуборочных комбайнов не обеспечивает безотрывную работу жатки в режиме копирования микрорельефа почвы, что приводит к возникновению дополнительных колебаний корпуса и потере урожая.

Интенсивность таких паразитных колебаний можно сократить. Для этого необходимо усовершенствовать конструкцию подвески, а именно: увеличить вылет жатвенной части от корпуса молотилки (увеличение размера c, см. рис. 1) и уменьшить жесткость c_3 подвески жатки.

Выводы.

1. Частотные характеристики реакции от башмаков зависят от параметров подвески жатки и молотилки.
2. Система подвески жатки в отечественных зерноуборочных комбайнах не обеспечивает безотрывную работу жатки в режиме копирования микрорельефа почвы, что приводит к возникновению дополнительных колебаний корпуса и потере урожая.
3. Интенсивность паразитных колебаний можно сократить, увеличив вылет жатвенной части от корпуса молотилки и уменьшив жесткость подвески жатки.
4. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для синтеза подвески жатвенной части зерноуборочного комбайна с целью снижения потерь урожая.

Библиографический список

1. Антибас, И.-Р. Исследование процесса обмолота тангенциально-аксиальным сепарирующим устройством в зависимости от распределения зерновой массы по зонам / И.-Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Научное обозрение. — 2016. — № 23. — С. 87–91.

2. Жаров, В. П. Динамика двухмассовой колебательной системы зерноуборочного комбайна (жатка-молотилка) / В. П. Жаров, В. А. Фокин // Исследование рабочих органов сельскохозяйственных машин. Вып. II. — Ростов-на-Дону : Изд-во РИСХМ, 1973. — 45 с.

3. Грошев, Л. М. Применение методов математического моделирования при исследовании динамики корпусов мобильных сельскохозяйственных машин / Л. М. Грошев, С. А. Партко, А. Н. Сиротенко // Научное обозрение. — 2016. — № 23. — С. 92–95.

4. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 464 с.

5. Лурье, А. В. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А. В. Лурье. — Москва : Колос, 1981. — 382 с.

6. Сравнение параметров разгона мобильной машины с механическим и гидромеханическим приводом / Л. М. Грошев [и др.] // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : мат-лы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 16-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2013». — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2013. — С. 74–76.

7. Грошев, Л. М. Повышение работоспособности бортового редуктора комбайна серии «Дон» / Л. М. Грошев, С. А. Партко, А. Г. Дьяченко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : мат-лы 7-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 17-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2014». — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2014. — С. 89–90.

References

1. Antipas, I.-R., Dyachenko, A.G., Savostina, T.P. Issledovanie protsessa obmolota tangentsial'no-aksial'nym separiruyushchim ustroystvom v zavisimosti ot raspredeleniya zernovoy massy po zonam. [Research of the threshing process with tangential-axial breaking unit in dependence of grain mass zone division.] Science Review, 2016, no. 23, pp. 87–91(in Russian).

2. Zharov, V.P., Fokin, V.A. Dinamika dvukhmassovoy kolebatel'noy sistemy zernouborochnogo kombayna (zhatka-molotilka). [Dynamics of two-mass oscillatory system of combine harvester (reaper-separator).] Issledovanie rabochikh organov sel'skokhozyaystvennykh mashin. Vyp. II. [Study on agricultural machine tools. Iss. II.] Rostov-on-Don: Izd-vo RISKhM, 1973, 45 p. (in Russian).

3. Groshev, L.M., Partko, S.A., Sirotenko, A.N. Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri issledovanii dinamiki korpusov mobil'nykh sel'skokhozyaystvennykh mashin. [Application of mathematical simulation methods in the study of mobile agricultural machines frames dynamics.] Science Review, 2016, no. 23, pp. 92–95 (in Russian).

4. Sveshnikov, A.A. Prikladnye metody teorii sluchaynykh funktsiy. [Applied approaches to the theory of random functions.] 3rd reimpression. St. Petersburg: Lan, 2011, 464 p. (in Russian).

5. Lurie, A.V. Statisticheskaya dinamika sel'skokhozyaystvennykh agregatov. [Statistical dynamics of agricultural aggregates.] Moscow: Kolos, 1981, 382 p. (in Russian).

6. Groshev, L.M., et al. Sravnenie parametrov razgona mobil'noy mashiny s mekhanicheskim i gidromekhanicheskim privodom. [Comparison of acceleration parameters of mobile machine with mechanical and hydromechanical drive.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: mat-ly 6-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 16-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2013». [State and prospects of agricultural engineering development: Proc. 6th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of 16th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2013”.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013, pp. 74–76 (in Russian).

7. Groshev, L.M., Partko, S.A., Dyachenko, A.G. Povyshenie rabotosposobnosti bortovogo reduktora kombayna serii «Don». [Performance improvement of combine onboard reducer of “Don” line.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: mat-ly 7-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 17-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2014». [State and prospects of agricultural engineering development: Proc. 7th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of 17th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2014”.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2014, pp. 89–90 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.03.2017
Сдана в редакцию 29.03.2017
Запланирована в номер 03.04.2017

Received 22.03.2017
Submitted 29.03.2017
Scheduled in the issue 03.04.2017

Об авторах:

Грошев Леонид Матвеевич,
профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
kaf-qm@dstu.edu.ru

Партко Светлана Анатольевна,
старший преподаватель кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-8568-0716
parlana@spark-mail.ru

Сиротенко Андрей Николаевич,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
andsirotenko@yandex.ru

Authors:

Groshev, Leonid M.,
professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
kaf-qm@dstu.edu.ru

Partko, Svetlana A.,
senior lecturer of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand. Sci. (Eng.),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-8568-0716
parlana@spark-mail.ru

Sirotenko, Andrey N.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand. Sci. (Eng.),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
andsirotenko@yandex.ru

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.22 10.23947/1992-5980-2017-17-2-136-140

Определение закона распределения плотности вероятностей числаколониеобразующих единиц в технологическом процессе обеззараживания стоков животноводческих ферм*

Н. В. Лимаренко[1], В. П. Жаров[2]**

[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Determination of the law of probability density distribution of colony-forming units number under livestock waste disinfection***

N. V. Limarenko[1], V. P. Zharov[2]**

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассмотрен перспективный способ обеззараживания стоков животноводческих ферм. Суть способа заключается в комплексном физико-химическом воздействии переменного электромагнитного поля в сочетании с химическим реагентом. Устройством реализации предложенного способа является индуктор. В качестве наиболее существенного параметра, характеризующего качество технологического процесса обеззараживания стоков животноводческих ферм, выбрано остаточное число колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий. Для повышения эффективности исследования технологического процесса обеззараживания стоков животноводческих ферм предлагается использовать математическую теорию планирования эксперимента, применение которой подразумевает нормальный закон распределения частоты значений колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий.

Материалы и методы. В ходе проведения данного исследования использовались следующие методы: инструментального прямого и косвенного измерения; микрокопирования; наименьших квадрантов, теоретического определения распределения случайной величины и статистической обработки данных.

Результаты исследования. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения производилась постановкой эксперимента на стенде с определёнными условиями. В результате проведенных экспериментов была получена выборка значений, состоящая из 100 наблюдений. На основании анализа априорной информации была принята гипотеза о нормальном законе распределения частоты значений колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий.

Обсуждения и заключения. При исследовании закона распределения частоты значений колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий, характеризующих качество процесса обеззараживания, было произведено сравнение принятого критического значения критерия Пирсона с расчётным. Поскольку расчётное значение меньше принятого критического, то гипотеза о нормальном законе распределения принимается.

Introduction. An advanced technique of the livestock waste disinfection is considered. The essence of the method is in the integral physicochemical action of the alternating magnetic field combined with a chemical agent. The inductor can implement this method. A residual number of the colony-forming units of total coliforms is selected as the most critical parameter characterizing the quality of the disinfection process of livestock effluents. It is proposed to use the mathematical experimental design theory to improve the efficiency of investigating the disinfection process of livestock waste. Its application implies a normal law of distribution of the value frequency of colony-forming units of total coliforms.

Materials and Methods. In the course of this study, the following methods were used: direct and indirect instrumental measurement; micrographics; least quadrants, theoretical definition of the random distribution, and statistical data processing.

Research Results. The hypothesis on a normal distribution law was tested by setting up an experiment at the stand with certain conditions. As a result of the conducted experiments, a sample of values consisting of 100 observations is obtained. Based on the aprior information analysis, a hypothesis on the normal distribution law of the value frequency of colony-forming units of total coliforms was adopted.

Discussion and Conclusions. In the course of studying the distribution law of the value frequency of colony-forming units of total coliforms characterizing the quality of the disinfection process, the accepted critical value of the Pearson test was compared to the calculated one. Since the design value is less than the adopted critical one, the hypothesis on a normal distribution law is accepted.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E -mail: limarenkodstu@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: обеззараживание; стоки животноводческих ферм; индуктор; остаточное число колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий, закон распределения плотности вероятностей.

Keywords: disinfection, livestock waste, inductor, residual number of colony-forming units of total coliforms, elementary probability law.

Введение. Стоки сельского хозяйства являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды патогенными и условно-патогенными микроорганизмами. Наибольшую опасность представляют стоки животноводческих ферм. Анализ источников [1–3] показал, что наиболее перспективным способом обеззараживания является комплексное физико-химическое воздействие переменным электромагнитным полем в сочетании с химическим реагентом.

Процесс обеззараживания стоков животноводческих ферм — сложное явление, зависящее от множества одновременно действующих факторов.

Повысить эффективность исследования можно используя математическую теорию планирования эксперимента, получившую широкое распространение в ряде областей науки благодаря работам [3–8].

Однако в исследованиях процесса обеззараживания стоков животноводческих ферм она используется еще недостаточно широко, что существенно снижает их эффективность.

Применение математической теории планирования эксперимента предусматривает нормальный закон распределения параметра, характеризующего качество процесса обеззараживания.

Одним из наиболее существенных параметров, характеризующих качество технологического процесса обеззараживания стоков животноводческих ферм, является остаточное число колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий (КОЕ ОКБ).

Поэтому определение закона распределения плотности вероятностей (далее частоты) КОЕ ОКБ в стоках животноводческих ферм после их обеззараживания является актуальной задачей. Это и являлось целью данного исследования.

Экспериментальное исследование. Решение этого вопроса производилось постановкой эксперимента на стенде, описанном в [3], в следующих условиях:

– заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора, $\rho = 2{,}96$ %;

– диаметр рабочих тел $d = 1{,}5$ мм;

– длина рабочих тел $l = 20$ мм;

– магнитная индукция $B = 60$ мТл;

– концентрация реагента $\omega = 0{,}4$ % от нормы;

– продолжительность совместного воздействия электромагнитного поля, химического реагента и рабочих тел $t =$ 4 с.

В результате проведенных экспериментов была получена выборка значений КОЕ ОКБ $p_{КОЕ\ ОКБ\ 1}$, $p_{КОЕ\ ОКБ\ 2}$, …, $p_{КОЕ\ ОКБ\ N}$, состоящая из 100 наблюдений.

Полученные в результате эксперимента данные после первичной обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Статистические характеристики КОЕ ОКБ

Statistical characteristics of CFU TC (Colony-Forming Units of Total Coliforms)

Номер интервала	Интервал	Середина интервала p_{cui}^{cu}	Частота	
			эмпирическая m_i	теоретическая m_i'
1	68…69	68,571	6	4
2	69…70	69,714	15	11
3	70…71	70,857	17	20
4	71…73	72,000	22	25
5	73…74	73,143	18	21
6	74…75	74,286	14	12
7	75…76	75,429	8	5
Сумма			100	98

На основании анализа априорной информации была принята гипотеза о нормальном законе распределения частоты значений КОЕ ОКБ, которая выражается зависимостью:

$$f(p)=\frac{1}{S_p\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(p_i-\mu_p)^2}{2S_p^2}} \quad (1)$$

где S_p — среднеквадратичное отклонение случайной величины p;

μ_p — оценка математического ожидания случайной величины p.

Определение параметров эмпирического распределения (табл. 1) и выравнивание кривых производилось согласно [9, 10].

Графики эмпирической и теоретической частоты распределений значений остаточного числа КОЕ ОКБ, представлены на рис. 1.

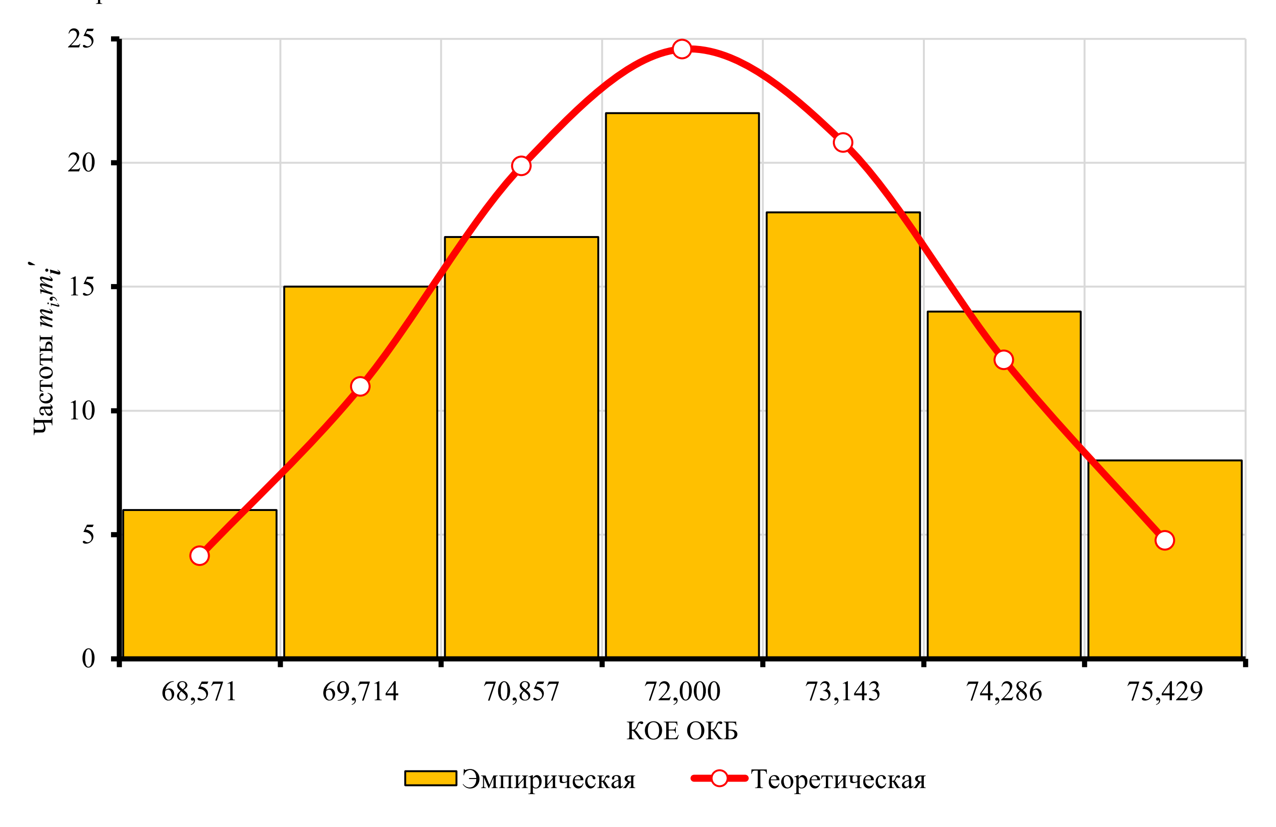


Рис. 1. Графики эмпирического и теоретического
распределения частоты значений КОЕ ОКБ процесса обеззараживания

Fig. 1 Graphs of empirical and theoretical distribution of value frequency
for CFU TC of disinfection process

Для проверки согласованности частот распределения, полученных по данным выборки, с теоретической использовался критерий согласия Пирсона $\chi_П^2$, являющийся наиболее состоятельным при большом числе наблюдений [10]. Его состоятельность заключается в том, что он почти всегда определяет неверную гипотезу и обеспечивает минимальную ошибку в принятии неверной гипотезы по сравнению с другими критериями.

$$\chi_p^2 \le \chi_{кр}^2 \quad (2)$$

Область принятия гипотезы определялась неравенством

где χ_p^2 — расчётное значение критерия Пирсона;

$\chi_{кр}^2$ — критическое значение критерия Пирсона.

Расчётное значение критерия Пирсона определялось по формуле

$$\chi_p^2=\sum_{i=1}^{k}\frac{(m_i-m_i')^2}{m_i'} \quad (3)$$

для КОЕ ОКБ $\chi_{p\,КОЕ\,ОКБ}^2=4,47$.

Число степеней свободы для критического значения критерия Пирсона

$$f_П=k_и-r-1 \quad (4)$$

где $k_и$ — количество интервалов, на которые делится выборка;

$r_{кп}$ — количество параметров теоретической функции распределения. Так как нормальный закон распределения двухпараметрический, то $r_{кп} = 2$.

При исследовании закона распределения частоты значений КОЕ ОКБ, характеризующих качество процесса обеззараживания, было принято следующее критическое значение критерия Пирсона $\chi^2_{кр} = 15{,}51$.

Так как расчётное значение критерия Пирсона меньше критического значения, при уровне значимости α=0,05, то гипотеза о нормальном законе распределения частоты значений КОЕ ОКБ, характеризующего качество процесса обеззараживания, принимается.

Заключение. Убедившись в нормальном законе распределения частоты значений КОЕ ОКБ, характеризующего качество процесса обеззараживания, можно переходить к дальнейшим исследованиям методами математической теории планирования эксперимента.

Библиографический список

1. Лимаренко, Н. В. Анализ процесса обеззараживания стоков сельского хозяйства электромагнитным полем [Электронный ресурс] / Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров, Б. Г. Шаповал // Молодой исследователь Дона. — 2016. — № 1. — Режим доступа: http://mid-journal.ru/upload/iblock/444/444610884667126 efef1ed54ff367356.pdf_ (дата обращения: 08.09.2016).

2. Лимаренко, Н. В. Анализ способов обеззараживания / Н. В. Лимаренко // Сб. тр. 8-й межд.-й науч. практ. конф. «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 605–608.

3. Лимаренко, Н. В. Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора / Н. В. Лимаренко [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 1. — С. 136–142.

4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Наука, 1976. — 280 с.

5. Минько, А. А. Статистический анализ в MS Excel / А. А. Минько — Москва : Вильямс, 2004. — 448 с.

6. Блинова, Е. И. Планирование и организация эксперимента / Е. И. Блинова. — Минск : БГТУ, 2010. — 130 с.

7. Порсев, Е. Г. Организация и планирование экспериментов / Е. Г. Порсев. — Новосибирск : НГТУ, 2010. — 155 с.

8. Karl Siebertz. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE) / Karl Siebertz, David van Bebber, Thomas Hochkirchen. — London. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. — 326 p.

9. Спирин, Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. — 257 с.

10. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров — 5-е изд., стер. — Москва : КНОРУС, 2013. — 448 с.

References

1. Limarenko, N.V., Zharov, V.P., Shapoval, B.G. Analiz protsessa obezzarazhivaniya stokov sel'skogo khozyaystva elektromagnitnym polem. [Process analysis of agricultural wastewater treatment with electromagnetic field.] Young Researcher of the Don, 2016, no. 1. Available at: http://mid-journal.ru/upload/iblock/444/444610884667126 efef1ed54ff367356.pdf (Accessed: 08.09.2016) (in Russian).

2. Limarenko, N.V. Analiz sposobov obezzarazhivaniya. [Analysis of disinfection methods.] Sb. tr. 8-y mezhd.-y nauch. prakt. konf. «Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya». [Proc. 8-th Int. Sci.-Pract. Conf. “State and prospects of the development of agricultural machinery”.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 605–608(in Russian).

3. Limarenko, N.V., et al. Issledovanie parametrov magnitnogo polya v rabochey kamere induktora. [Study on magnetic field parameters in the inductor working chamber.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 1, pp. 136–142 (in Russian).

4. Adler, Y.P., Markova, E.V., Granovskiy, Y.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy. [Planning an experiment when searching for optimal conditions.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Nauka, 1976, 280 p. (in Russian).

5. Minko, A.A. Statisticheskiy analiz v MS Excel. [Statistical analysis in MS Excel.] Moscow: Williams, 2004, 448 p. (in Russian).

6. Blinova, E.I. Planirovanie i organizatsiya eksperimenta. [Planning and organizing an experiment.] Minsk: BGTU, 2010, 130 p. (in Russian).

7. Porsev, E.G. Organizatsiya i planirovanie eksperimentov. [Organizing and planning experiments.] Novosibirsk: NGTU, 2010, 155 p. (in Russian).

8. Siebertz, Karl, van Bebber, David, Hochkirchen, Thomas. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). London. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010, 326 p.

9. Spirin, N.A., Lavrov, V.V. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenernogo eksperimenta. [Methods for planning and processing the results of an engineering experiment.] Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2004, 257 p. (in Russian).

10. Ventsel, E.S., Ovcharov, L.A. Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya. [Theory of stochastic processes and its engineering applications.] 5th reimpression. Moscow: KNORUS, 2013, 448 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 07.02.2017
Сдана в редакцию 07.02.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 07.02.2017
Submitted 07.02.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Лимаренко Николай Владимирович,
аспирант Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID:http://orcid.org/0000-0003-3075-2572
nikolajj-limarenko@rambler.ru

Жаров Виктор Павлович,
профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5645-447X

Authors:

Limarenko, Nikolay V.,
postgraduate student, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3075-2572
nikolajj-limarenko@rambler.ru

Zharov, Victor P.,
professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr. Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5645-447X

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 504:351.77 10.23947/1992-5980-2017-17-2-141-147

Защита рабочей зоны литейных цехов машиностроительного производства*

Е. И. Головина[1], И. А. Иванова[2], М. В. Манохин[3]**
[1,2,3] Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация

Working area protection in foundry shops of machinery production***

E. I. Golovina[1], I. A. Ivanova[2], M. V. Manokhin[3]**
[1,2,3] Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Введение. Целью работы является изучение промышленной безопасности литейного производства. Решалась задача оценки дисперсного состава пыли, определяющего микроклимат рабочей зоны литейного цеха. Выявлена зависимость между размером частиц и скоростью их движения под действием гравитационных или центробежных сил.
Материалы и методы. Методом лазерной дифракции, реализуемой на лазерном анализаторе частиц Fritsch NanoTec «ANALISETTE 22», проведено гранулометрическое определение состава пробы порошка пыли.
Результаты исследования. Анализ данных показал, что все фазы технологического процесса определяют микроклимат внутренней среды и, при рассеивании выбросов, среды в межкорпусной зоне. Степень воздействия зависит от дисперсности и химического состава пыли. Присутствующие в воздухе другие вредные вещества, осаждающиеся на частицах пыли, делают её более опасной. К примеру, увеличение содержания SiO2 ужесточает требования к чистоте воздуха рабочей зоны. Поэтому необходимо учитывать более жесткие значения предельно-допустимых концентраций (ПДК).
Обсуждение и заключение. Определены наиболее опасные с позиций экологического риска участки литейного производства и внесены предложения по доработке системы пылеулавливания с использованием мокрой очистки. Результаты проведенных исследований могут быть использованы в литейном производстве машиностроительной отрасли.

Ключевые слова: рабочая зона, литейное производство, дисперсность, пыль, концентрация, гранулометрический анализ.

Introduction. The work objection is the investigation of the industrial safety of the foundry. The task to estimate a disperse composition of dust which determines the microclimate of the foundry working area is being solved. The dependence between the particle size and their motion speed under the gravitational or centrifugal forces is revealed.
Materials and Methods. The granulometric composition analysis of a powder dust sample is carried out by the laser diffraction method implemented on the laser particle analyzer Fritsch NanoTec "ANALISETTE 22".
Research Results. The data analysis shows that all phases of the process determine the microclimate of the internal environment and, under the emission dispersion, the medium in the intercase zone. The impact degree depends on the dispersion and chemical composition of dust particles. The other harmful airborne substances deposited on dust particles make it more dangerous. For example, an increase in SiO2 content toughens the requirements for clean air in the working area. Therefore, it is necessary to take into account more rigorous values of maximum permissible concentrations (MPC).
Discussion and Conclusions. The most dangerous areas of the foundry production in the eco-risk terms are identified; and proposals on the development of the dust-collecting system with water wash are made. The research results can be used in foundries of the machinery production.

Keywords: working area, foundry, dispersability, dust, concentrations, granulometric composition analysis.

Введение. В литейном производстве на различных этапах технологического процесса в воздух рабочей зоны в высоких концентрациях попадают пыль и вредные газы. При плавке металла и обработке отливок выделяются взвешенные и газообразные контаминанты. Экологическая обстановка в цехе обработки отливок определяется технологическими процессами, происходящими при металлозавалке компонентов [1,3].

Защита атмосферного воздуха от пыли в настоящее время производится циклоном с последующим факельным выбросом в межкорпусную зону. В литейном цехе дробеструйная обработка отливок ведется в специальной герметичной камере. Оператор защищен от пыли респиратором.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: u00111@vgasu.vrn.ru, ivanova-eco@mail.ru, manohinprof@mail.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.

В рабочей зоне литейных цехов, кроме пыли, присутствуют также оксиды углерода, сернистый газ, азот и его окислы, аэрозоли, пары углеводородов и др. [4,5]. Литейный цех машиностроительного производства располагается в городской застройке. Степень экологической безопасности определяется микроклиматом в зоне дробеструйной установки и, при рассеивании выбросов, в межкорпусной зоне завода [6,7].

Учет влияния нескольких присутствующих в воздухе загрязняющих веществ проводится по формуле (1):

$$\frac{K_1}{ПДК_1}+\frac{K_2}{ПДК_2}+\ldots+\frac{K_n}{ПДК_n}\leq 1 \qquad (1)$$

Оценка концентраций пыли в зоне работы операторов дробеструйной камеры составляет от 14 до 24 мг/м^3.

Задачей данной работы является обеспечение безопасных уровней предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ в зоне работы оператора дробеструйного участка и в заветренной зоне литейного цеха.

В связи с тем, что существующая система пылеулавливания, использующая циклоны неэффективна, имеет место многократное превышение предельно-допустимых концентраций (ПДК) пыли. Фактическая эффективность действующих в цехе пылеуловителей является недостаточной. С целью доочистки выброса в межкорпусную зону и доведения ПДК контаминантов в рабочей зоне до приемлемого уровня система пылеулавливания может быть дополнена второй «мокрой» ступенью.

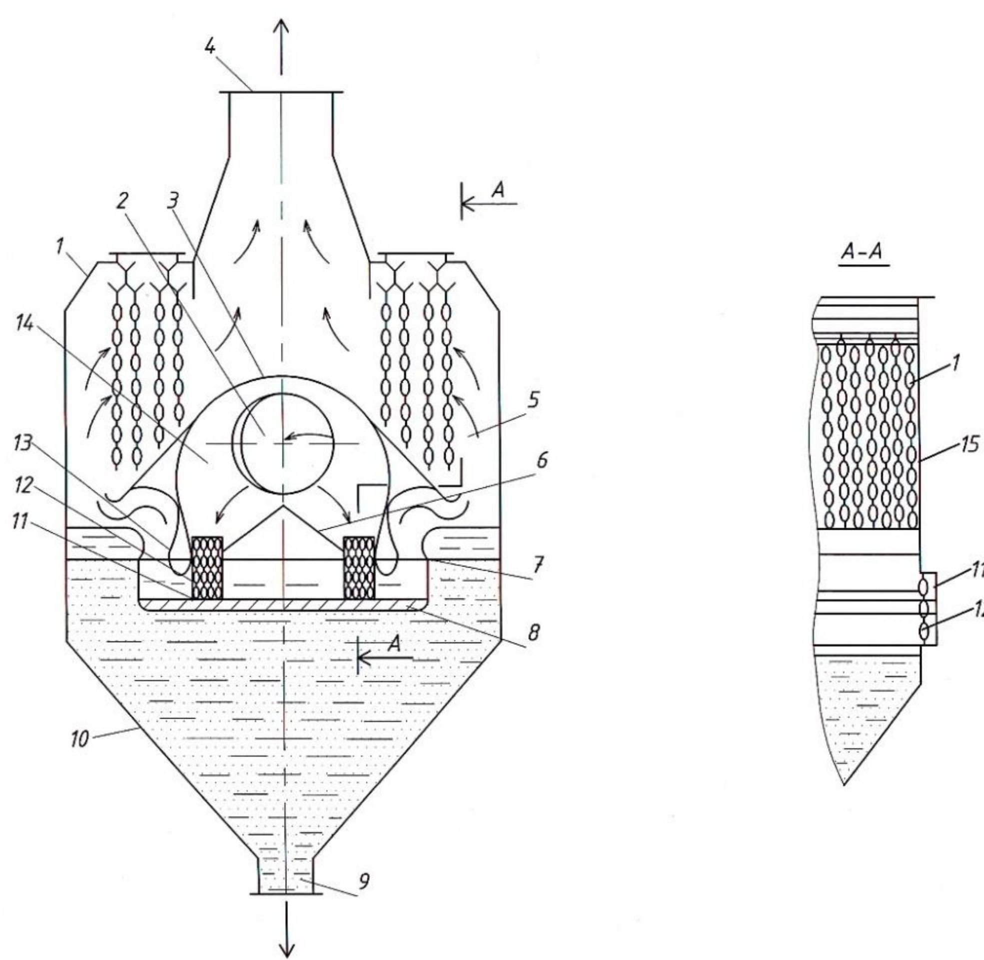


Рис. 1. Мокрый пылеуловитель:

1 — корпус; 2 — входной патрубок; 3 — перегородка; 4 — выходной патрубок; 5 — камера очищенного газа; 6 — отражательные пластины; 7 — нижняя перегородка; 8 — жалюзийная решетка; 9 — патрубок для удаления шлама; 10 — бункер для сбора уловленной пыли; 11 — карман; 12 — зашторенные свободно висящие цепи; 13 — верхняя перегородка; 14 — камера запыленного газа; 15 — каплеуловитель

Fig. 1. Wet-Dust Collector:

1 — housing; 2 — inlet fitting; 3 — baffle; 4 — outlet fitting; 5 — chamber of treated gas; 6 — deflector plates; 7 — lower baffle; 8 — louver; 9 — desliming fitting; 10 — dust-collecting hopper; 11 — pocket; 12 — shuttered dangle chains; 13 —upper baffle; 14 — dusty gas chamber; 15 — drop catcher

Авторами В. И. Семкиным, А. В. Думновым, Н. И. Аджиевым предлагается устройство для очистки выбросов, которые разработано в научно-исследовательском и проектном институте по охране труда строительных материалов (НИПИОТострома) [2].

В работах [8–10] предлагается оценка категории экологической опасности предприятия $К_{эоп}$ по четырем классам. $К_{эоп}$ — коэффициент экологической опасности предприятия — определяется по формуле:

$$K_{ЭОП} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{M_i}{C_{ПДК_i}} \right) a_i \qquad (2)$$

где M_i — масса загрязняющего вещества, т/год; $СПДК_i$ = Ci / ПДКр.з. — концентрация загрязняющего вещества в долях ПДКр.з., a_i — коэффициент, учитывающий класс опасности i-го вещества: a_i = 1,7 — 1-й класс опасности; a_2 = 1,3 — 2-й класс опасности; a_3 = 1,0 — 3-й класс опасности; a_4 = 0,9 — 4-й класс опасности. $К_{эоп}$ >106 — соответствуют предприятиям 1-й категории, наиболее активно загрязняющим атмосферу. 106>$К_{эоп}$>104 — 2-й категории, 104>$К_{эоп}$ ≥103 — 3-й категории, $К_{эоп}$ <103 — 4-й категории.

Для анализа оценки категории предприятия производится расчет на основе требуемого потребления воздуха (ТПВ), м^3/с, и параметра *R* для каждого *i*-го вещества и каждого источника *j* по формулам:

$$ТПВ_{ji} = 10^3 M_{ji} / ПДК_i \qquad (3)$$

$$R_{\mu} = \frac{D_j}{H_i + D_i} \times \frac{C_{ji}}{ПДК_i} \times 10^3 \qquad (4)$$

где M_{ji} — масса вещества, выбрасываемого источником в одну секунду, г/с; $ПДК_i$ — предельно допустимая концентрация вещества, мг/м^3; D_j — диаметр устья источника. Если устье источника не круглое, то за D_j принимают его наибольший размер, м. H_j — высота источника над уровнем земли, м; C_{ji} — концентрация вещества в устье источника, г/м^3.

При D_j>0,5 H_j выражение $D_j/(H_j + D_j)$ принимают равным единице. Значение параметра $П_i$, м^3/с, для каждого вещества определяют по следующей формуле:

$$П_i = \sum_{j=1}^{n} ТПВ_{ji} R_{ji} \quad (5)$$

где *n* — количество источников на предприятии, выбрасывающем одноименные вещества.

В частности, предлагается производить оценку категории предприятия, как загрязнителя воздуха, на основе коэффициента экологического риска $К_{эр}$:

$$K_{ЭР_{\mu}} = \sum_{j=1}^{n} 10^6 \frac{M_{ji} D_j C_{ji}}{ПДК_{ji}^2 \left(H_j + D_j\right)} = \sum_{j=1}^{n} 10^6 \frac{D_i}{H_j + D_i} \left(\frac{C_{ji}}{ПДК_{ji}} \right)^2 q_j \qquad (6)$$

Анализ данных показывает, что практически все фазы технологического процесса определяют микроклимат внутренней среды и в межкорпусной зоне при рассеивании выбросов [11].

Опасность воздействия пыли на здоровье человека зависит от дисперсного состава, который определяется количественным соотношением в ней фракций пыли различных размеров [12,13].

Основная часть. Для анализа пыли в рабочей зоне литейного цеха оператора дробеструйной камеры, использовали метод гранулометрического анализа, принцип действия которого основан на зависимости между размером и скоростью движения частиц пыли под действием гравитационных или центробежных сил. Определение гранулометрического состава предоставленной пробы пыли производилось методом лазерной дифракции, реализуемой на лазерном анализаторе частиц Fritsch NanoTec «ANALISETTE 22» (рис. 2,3) с пакетом управляющих программ Fritsch Mas control, в соответствии с требованиями ISO 13 320–2009 в Центре коллективного пользования имени профессора Ю. М. Борисова.

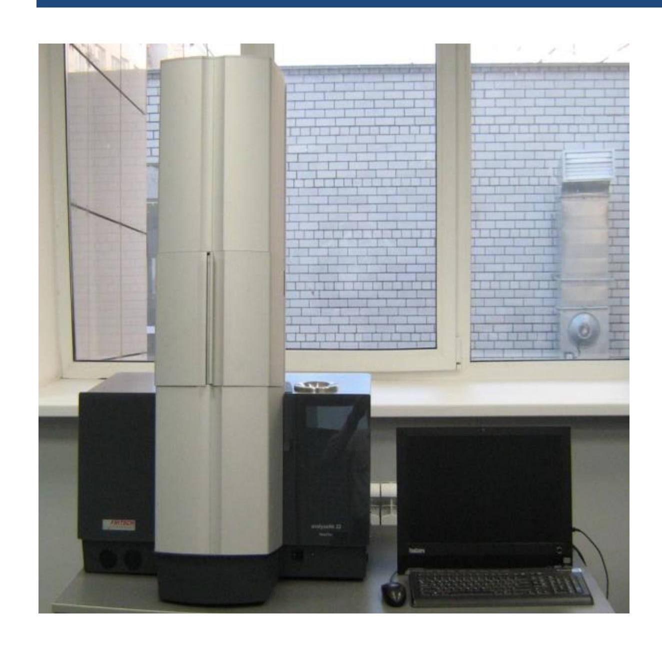


Рис. 2. Общий вид лазерного анализатора NanoTec Analysette-22 (Fritsch, Германия)

Fig. 2. General view of laser particle analyzer NanoTec Analysette-22 (Fritsch, Germany)

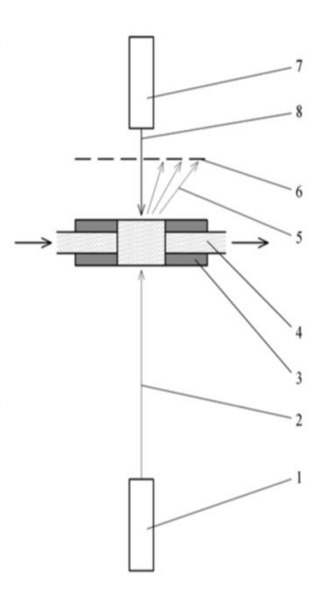


Рис. 3. Оптическая часть лазерного анализатора частиц Analysette-22 NanoTec:
1 — передний лазер; 2 — луч переднего лазера; 3 — измерительная ячейка; 4 — дисперсная среда, содержащая образец; 5 — рассеянное образцом лазерное излучение; 6 — детектор; 7 — задний лазер; 8 — луч заднего лазера

Fig. 3. Optical part of laser particle analyzer NanoTec Analysette-22:
1 — front laser; 2 — front laser ray; 3 — measuring cell; 4 — dispersion medium containing a sample; 5 — laser emission scattered by sample; 6 — detector; 7 — rear laser; 8 — rear laser ray

Для исследования частиц в анализаторе используется принцип дифракции лазерного излучения на дисперсных образцах и далее для анализа модель Фраунгофера. Данная модель используется только для образцов с частицами крупнее 0,1 мкм (100 нм).

Обоснование полученных результатов. По результатам проведенного анализа определен гранулометрический состав представленных проб. Результаты сведены в таблицу 1 и представлены на рис. 4.

Таблица 1

Table 1

Процентное содержание частиц определенного размера определенное методом гранулометрического анализа

Percentage content of size-defined particles determined by granulometric composition analysis method

Значение, %	Размер частиц, мкм	Значение, %	Размер частиц, мкм	Значение, %	Размер частиц, мкм
%	<= 0,050мкм	0,9%	<=1,000мкм	1,5%	<=2,000мкм
1,9%	<=3,000мкм	2,0%	<=4,000мкм	2,2%	<=5,000мкм
2,9%	<=10,000мкм	5,3%	<=20,000мкм	39,9%	<=50,000мкм
86,2%	<=100,000мкм	99,6%	<=200,000мкм		

Из таблицы видно, что размер 86,2% частиц пробы имеют размер меньше 100 мкм, 13,8% — более 100 мкм. Частицы размером менее 10 мкм являются наиболее опасными для здоровья человека, так как вызывают пневмокониозы, а при наличии пленки SiO_2 — силикозы.

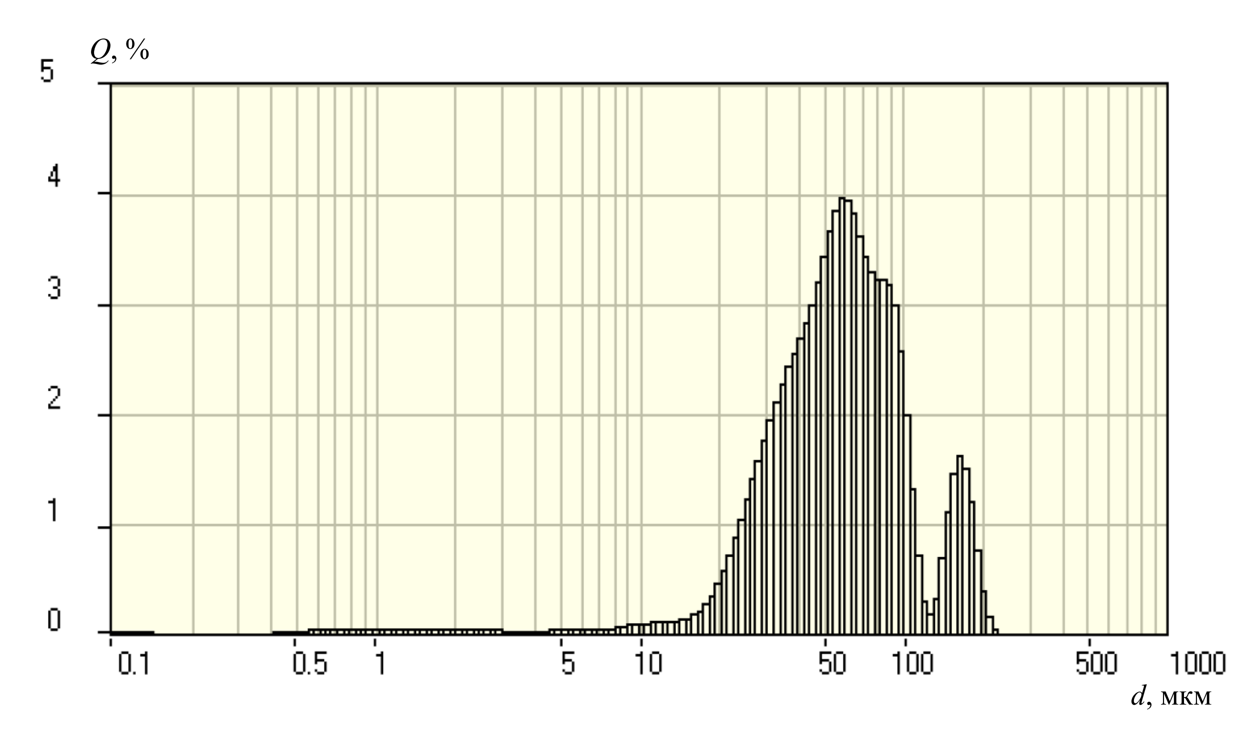


Рис. 4. Графические результаты дисперсного анализа распределения пылевых частиц

Fig. 4. Diagrammatic results of distribution analysis of dust particles

В связи с тем, что количество мелкодисперсной пыли менее 100 мкм составляет 86,2 %, существующая сухая система пылеулавливания дополнена второй мокрой ступенью в целях доочистки выброса в межкорпусную зону до уровня ПДК$_{р.з.}$

Выводы.

1. Изучение структуры пыли, образующейся на дробеструйном участках в процессе дисперсного (гранулометрического) анализа показало, при дроблении 86,2 % выделяемой пыли имеет размер фракций менее 100 мкм, т.е. относится к средней и тонкой пыли, имеющей скорость оседания менее 7 см/с.
2. Состояние воздуха в литейном цехе характеризуется превышением ПДК вредных веществ над рабочей зоны в 7–12 раз.
3. Для литейного цеха с целью очистки выбросов рекомендована установка двухступенчатой системы пылеочистки: 1-ая ступень — с центробежными циклонами, 2-ая ступень — мокрая очистка НИПИОТстрома.

Библиографический список

1. Азаров, В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий : автореф. дис. д-ра техн. наук / В. Н. Азаров. — Ростов-на-Дону, 2004. — 47 с.
2. А. С. 556825. Мокрый пылеуловитель / Науч.-исслед. и проектный ин-т по газоочистным сооружениям, технике безопасности и охране труда в пром-сти строит. материалов; Авт. Изобрет.: В.И. Семкин, А.В. Думнов, Н. И. Аджиев. – Заявл. 04.02.76, №2321595/26; Опубл. В Б.И., 1977, №17; МКИ в 01 D 47/02; в 01 D 45/08.
3. Белов, С. В. Охрана окружающей среды / С. В. Белов. — 2-е изд. — Москва : Высш. шк., 1991. — 319 с.
4. Болдин, А. Н. Литейное производство с точки зрения экологии / А.Н. Болдин // Литейное производство. — 2005. — № 3. — с. 33–34.
5. Болдин, А. Н. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник / А. Н. Болдин, С. С. Давыдов, Н. И. Жуковский. — Москва : Машиностроение, 2006. — 507 с.
6. Головина, Е. И. Опасные и вредные факторы литейного производства и их влияние на состояние атмосферы в рабочей зоне / Вестник технологического университета. — 2016. — Т.19, № 23 — С. 126–131.
7. Головина, Е. И., Оценка опасных факторов литейного производства /Е. И. Головина, В. Я Манохин. И. А. Иванова // Комплексные проблемы техносферной безопасности: сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. — Воронеж — 2016. — С. 170–173.
8. Иванова, И. А. Определение коэффициента экологической опасности литейного производства / И. А. Иванова // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2010. — Т.10, №3 (46). — С. 406–409.
9. Иванова, И. А. Оценка дисперсного состава пыли участка черного литья / И. А. Иванова, В. Я. Манохин //

Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2010. — Т.10, №2 (45). — С. 200–204.

10. Иванова, И. А. Оценка запыленности рабочей зоны дробеструйного участка и выбивных решеток литейного производства. / И. А. Иванова, В. Я. Манохин, Е. И. Головина // Комплексные проблемы техносферной безопасности : сб. трудов XI междунар. науч.-практ. конф. — Воронеж — 2015. — С.129–136.

11. Козлов, Л. Я. Производство стальных отливок / Л. Я. Козлов, В. М. Колокольцев, К. Н. Вдовин; под ред. Л. Я. Козлова. — Москва : МИСИС, 2003. — 352 с.

12. Матюхов, В. Г. Техника безопасности в литейном производстве / В. Г. Матюхов. — Москва : Высшая школа, 1980. — 94 с.

13. Трухов, Ю. А. Технология литейного производства: литье в песчаные формы / А. П. Трухов, Ю. А. Сорокин, М. Ю. Ершов; под ред. А.П. Трухова. — Москва : Академия, 2005. — 524 с.

References

1. Azarov, V.N. Kompleksnaya otsenka pylevoy obstanovki i razrabotka mer po snizheniyu zapylennosti vozdushnoy sredy promyshlennykh predpriyatiy : avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk. [Comprehensive assessment of the dust conditions and development of measures on reduction of dustiness of the air environment of industrial enterprises: Dr.Sci. (Eng.) diss., author's abstract.] Rostov-on-Don, 2004, 47 p. (in Russian).

2. Semkin, V.I., Dumnov, A.V., Adzhiev, N.I. Avtorskoe svidetel'stvo 556825. Mokryy pyleulovitel'. [Authorship certificate 556825. Wet-dust collector.] Research and Design Institute for Gas Treatment Facilities, Safety and Health Regulations in Construction Materials Industry, 1977 (in Russian).

3. Belov, S.V. Okhrana okruzhayushchey sredy. [Environment protection.] 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 319 p. (in Russian).

4. Boldin, A.N. Liteynoe proizvodstvo s tochki zreniya ekologii. [The Foundry Industry from the Point of View of Unified Assessment of Ecological Compatibility.] Foundry. Technologies and Equipment. 2005, no. 3, pp. 33–34 (in Russian).

5. Boldin, A.N., Davydov, S.S., Zhukovskiy, N.I. Liteynye formovochnye materialy. Formovochnye, sterzhnevye smesi i pokrytiya: spravochnik. [Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings: Reference book.] Moscow: Mashinostroenie, 2006, 507 p. (in Russian).

6. Golovina, E.I. Opasnye i vrednye faktory liteynogo proizvodstva i ikh vliyanie na sostoyanie atmosfery v rabochey zone. [Dangerous and harmful factors of foundry production and their effect on air condition in the working area.] Herald of Kazan Technological University, 2016, vol.19, no. 23, pp. 126–131 (in Russian).

7. Golovina, E.I., Manokhin, V.Y., Ivanova, I.A. Otsenka opasnykh faktorov liteynogo proizvodstva. [Assessment of hazardous factors in foundry.] Kompleksnye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti: sb. trudov mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Systemic problems of technosphere safety: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.] Voronezh, 2016, pp. 170–173 (in Russian).

8. Ivanova, I.A. Opredelenie koeffitsienta ekologicheskoy opasnosti liteynogo proizvodstva. [Determination of the ecological hazard factor of the foundry.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 3 (46), pp. 406–409 (in Russian).

9. Ivanova, I.A, Manokhin, V.Y. Otsenka dispersnogo sostava pyli uchastka chernogo lit'ya. [Evaluation of dispersed dust composition of the ferrous foundry area.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 2 (45), pp. 200–204 (in Russian).a

10. Ivanova, I.A., Manokhin, V.Y., Golovina, E.I. Otsenka zapylennosti rabochey zony drobestruynogo uchastka i vybivnykh reshetok liteynogo proizvodstva. [Assessment of dustiness of the working area of bead-blasting area and shake-out tables of foundry production.] Kompleksnye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti: sb. trudov XI mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Systemic problems of technosphere safety: Proc. XI Int. Sci.-Pract. Conf.] Voronezh, 2015, pp. 129–136 (in Russian).

11. Kozlov, L.Y., Kolokoltsev, V.M., Vdovin, K.N. Proizvodstvo stal'nykh otlivok. [Steel founding production.] Kozlov, L.Y., ed. Moscow: MISIS, 2003, 352 p. (in Russian).

12. Matyukhov, V.G. Proizvodstvo stal'nykh otlivok. [Safety engineering in foundry.] Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 94 p. (in Russian).

13. Trukhov, Y.A., Sorokin, Y.A., Yershov, M.Y. Tekhnologiya liteynogo proizvodstva: lit'ye v peschanye formy. [Foundry technology: sand mold casting.] Trukhov, Y.A., ed. Moscow: Akademiya, 2005, 524 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 03.03.2017
Сдана в редакцию 03.03.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 03.03.2017
Submitted 03.03.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Головина Елена Ивановна,
заместитель директора по учебной работе института инженерных систем в строительстве, старший преподаватель кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» Воронежского государственного технического университета (РФ, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84) ,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2458-2039
u00111@vgasu.vrn.ru

Иванова Ирина Александровна,
доцент кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» Воронежского государственного технического университета (РФ, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), кандидат технических наук,
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-2589-3787
ivanova-eco@mail.ru

Манохин Максим Вячеславович,
ассистент кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» Воронежского государственного технического университета (РФ, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-9275-9708
manohinprof@mail.ru

Authors:

Golovina, Elena I.,
Vice Director for Learning and Teaching, Institute of Engineering Systems in Construction, senior lecturer of the Fire and Industrial Safety Department, Voronezh State Technical University (RF, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktayabrya Str., 84),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2458-2039
u00111@vgasu.vrn.ru

Ivanova, Irina A.,
associate professor of the Fire and Industrial Safety Department, Voronezh State Technical University (RF, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktayabrya Str., 84), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID : http://orcid.org/0000-0002-2589-3787
ivanova-eco@mail.ru

Manokhin, Maxim V.,
teaching assistant of the Fire and Industrial Safety Department, Voronezh State Technical University (RF, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktayabrya Str., 84),
ORCID : http://orcid.org/0000-0001-9275-9708
manohinprof@mail.ru